

**Werkstoffkundliche Untersuchungen zum Zirkondioxid-
Wurzelstift CosmoPost**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
doctor medicinae dentariae (Dr.med.dent)

**vorgelegt dem Rat der medizinischen Fakultät
der Friedrich-Schiller-Universität Jena**

von Katja Oehlkers
geboren am 19. April 1970 in Hannover

Gutachter:

1. PD Dr. F. Jahn, Jena
2. PD Dr. B. Sigusch, Jena
3. Prof. Dr. M. Kern, Kiel

Tag der öffentlichen Verteidigung: 30.06.2008

Inhaltsverzeichnis

Kapitel	Seite
1 Zusammenfassung	1
2 Einleitung	3
3 Ziele der Arbeit	8
4 Methodik	
4.1 Verwendete Materialien	9
4.1.1 CosmoPost-Wurzelstifte	9
4.1.2 IPS Empress® Cosmo Rohling	11
4.1.3 IPS Empress® 2-Schichttechnik: Rohlinge und Schichtmassen	13
4.1.4 FRC Postec-Wurzelstifte	15
4.1.5 Tetric® Ceram	16
4.1.6 Variolink® II-Befestigungskomposit/Dentinhaftsyste m Syntac Classic	17
4.1.7 Silikatisierungsverfahren	18
4.1.8 Opaker	20
4.1.9 ZrO ₂ /TiO ₂ -Lösung	20
4.2 Versuche	21
4.2.1 Überprüfung der Bruchfestigkeit von Stift-Stumpfaufbauten in extrahierten Zähnen	21
4.2.2 Überprüfung der Bruchfestigkeit von Stift-Stumpfaufbauten in extrahierten Zähnen mit Empress® 2-Kronen	24
4.2.3 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen	25
4.2.4 Untersuchungen zur Biegebruchfestigkeit (3-Punkt-Biegeversuch)	26
4.2.5 Verbunduntersuchungen des CosmoPost-Stiftes zum Aufbaumaterial IPS Empress® Cosmo Rohling und Tetric® Ceram	27
4.2.6 Verbunduntersuchungen des CosmoPost-Stiftes zum Aufbaumaterial IPS Empress® Cosmo Rohling und Tetric® Ceram nach Thermozyklierung	31

4.2.7	Verbunduntersuchungen von Postec®-Stiften mit dem Aufbaumaterial Tetric® Ceram	33
4.2.8	Verbunduntersuchungen von CosmoPost- und Postec®-Stiften mit dem Befestigungsmaterial Variolink® II im Vergleich	34
4.3	Statistik	35
5	Ergebnisse	
5.1	Bruchfestigkeit von CosmoPost/IPS Empress® Cosmo Stift Stumpfaufbauten	36
5.2	Bruchfestigkeit von CosmoPost/IPS Empress® Cosmo Stift- Stumpfaufbauten mit IPS Empress® 2-Kronen	37
5.3	Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen	38
5.4	Untersuchungen zur Biegebruchfestigkeit (3-Punkt- Biegeversuch)	41
5.5	Verbunduntersuchungen von CosmoPost-Stiften zum Aufbaumaterial	44
5.5.1	Druck-Scherfestigkeit von IPS Empress® Cosmo Rohling- Probekörpern an CosmoPost-Stiften	44
5.5.2	Druck-Scherfestigkeit von Tetric® Ceram-Probekörpern an CosmoPost-Stiften	46
5.5.3	Vergleich CosmoPost-Stifte/IPS Empress® Cosmo Rohling- Probekörper mit CosmoPost-Stiften/Tetric® Ceram-Probekörper	49
5.5.4	Druck-Scherfestigkeit von IPS Empress® Cosmo Rohling- Probekörpern an CosmoPost-Stiften nach Temperaturlastwechsel	50
5.5.5	Druck-Scherfestigkeit von Tetric® Ceram-Probekörpern an CosmoPost-Stiften nach Temperaturlastwechsel	52
5.6	Druck-Scherfestigkeit von Tetric® Ceram-Probekörpern an FRC Postec®-Stiften	53
5.7	Druck-Scherfestigkeit von Variolink® II-Probekörpern an CosmoPost- und FRC Postec®-Stiften	54
5.7.1	Variolink® II-Probekörper an CosmoPost-Stiften	54

5.7.2	Variolink® II-Probekörper an FRC Postec®-Stiften	56
6	Diskussion	57
7	Schlussfolgerung	74
8	Literaturverzeichnis	76
	Anhang – Statistische Auswertung	90

1 Zusammenfassung

Zur ästhetischen Versorgung wurzelkanalbehandelter Zähne werden zunehmend zahnfarbene Wurzelstifte und Stumpfmaterialien verwendet. Keramische Stift-Stumpfaufbau-Systeme auf der Grundlage von Zirkondioxid werden hierbei als Alternative zur Rekonstruktion mit glasfaserverstärkten Stiften und einem direkt hergestellten Stumpfaufbau aus Komposit eingesetzt. Der konfektionierte Wurzelstift CosmoPost (Ivoclar Vivadent) - aus mit Yttriumoxid teilstabilisierter Zirkondioxid-Keramik - kann mit einem direkten Aufbau aus Komposit versehen werden oder durch das Anpressen einer speziellen zirkondioxidhaltigen Keramik (IPS Empress® Cosmo Rohling, Ivoclar Vivadent) als indirekt hergestellter, individueller Stift-Stumpfaufbau genutzt werden. Mit der anschließenden Versorgung mit Vollkeramikkrone aus Empress® 2-Keramik entsteht ein metallfreies, hochwertiges und ästhetisches Endergebnis.

Im klinischen Einsatz dieses Systems und nachfolgenden *in vitro*-Tests wurden Frakturen beobachtet, die im oberen Drittel des Wurzelkanals lokalisiert sind, also im Bereich des Übergangs vom angepressten Aufbau zum Stift. Ziel der vorliegenden Arbeit war es, ausgehend von dieser Beobachtung, den Verbund zwischen Stift und Aufbau- bzw. Befestigungsmaterial werkstoffkundlich zu untersuchen. Mit einer speziellen Versuchsanordnung wurde die Verbundfestigkeit der verschiedenen Materialien nach unterschiedlicher Vorbehandlung der Stifte getestet.

Es wurde gezeigt, dass unterschiedliche Arten der Befestigung der Stift-Stumpfaufbauten keinen Einfluss auf die Druckfestigkeit hatten. Ein signifikanter Unterschied wurde jedoch bei der Befestigungsart bei Kronen deutlich. Bei adhäsiv eingegliederten Kronen erhöhte sich die Bruchfestigkeit um 31 % im Vergleich zu konventionell befestigten Kronen.

Da die Frakturstellen im Bereich des Kanaleingangs lagen, wurden die Wurzelstifte gesondert auf ihre Scherfestigkeit zum Verbund mit dem Aufbaumaterial getestet. Die CosmoPost-Stifte wurden in unterschiedlichster Weise vorbehandelt, mit zylindrischen Probekörpern aus angepresster Keramik (IPS Empress® Cosmo Rohling, Ivoclar Vivadent) oder aus dem Hybridkomposit

Tetric® Ceram (Ivoclar Vivadent) versehen und in einer Spezialvorrichtung bis zum Bruch belastet. Die Ermittlung der Scherfestigkeit wurde vor und nach Thermowechselbeanspruchung über 25.000 Zyklen zwischen 5° und 60°C durchgeführt. Zusätzlich wurden glasfaserverstärkte Wurzelstifte (FRC Postec®, Ivoclar Vivadent) ebenfalls verschieden vorbehandelt und Probekörper aus Tetric® Ceram-Komposit anmodelliert.

Bei allen Versuchen konnte durch Vorbehandlungsmethoden der Stifte eine deutliche Verbesserung der Druck-Scherfestigkeit erreicht werden. Für CosmoPost-Stifte mit IPS Empress® Cosmo Rohling-Probekörpern erwiesen sich die Kombinationen aus Korundstrahlen und Silicoateranwendung bzw. und Aufbringen von ZrO_2/Ti_2 -Lösung als besonders geeignete Konditionierungen mit signifikant höheren Festigkeitswerten im Vergleich zu unbehandelten Stiften. In den Versuchen mit Komposit-Probekörpern an CosmoPost- sowie an Postec®-Stiften zeigten sich signifikant höchste Werte nach Korundstrahlen, Silikatisierung und Opakerbeschichtung.

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass trotz der Abnahme der Druck-Scherfestigkeit nach Thermozyklisierung, die Vorbehandlungen eine Erhöhung der Druck-Scherfestigkeit im Verbund von Zirkondioxid- oder Glasfaserstiften mit den entsprechenden Aufbaumaterialien im Vergleich zu unbehandelten Stiften bewirken. Hierbei wurde festgestellt, dass die Vorbehandlung durch Korundstrahlen mit Silikatisierung per Silicoater-Verfahren im Falle der vollkeramischen Aufbauten und mit zusätzlicher Opakerbeschichtung im Falle der Kompositaufbauten, als besonders effektiv anzusehen ist.

2 Einleitung

Die Versorgung endodontisch behandelter Zähne ist in Bezug auf Ästhetik und Stabilisierung von Restzahnschubstanz oftmals problematisch. Durch Einlagerung von bakteriellen Abfallprodukten, nicht zahnfarbenen ehemaligen Füllungs-materialien oder Pulpenresten tritt zumeist eine gräuliche Verfärbung des Zahnes auf, die den heutigen ästhetischen Anforderungen, gerade im Frontzahnbereich, nicht gerecht wird. Die entsprechende Versorgung ist von der Größe des Substanzverlustes abhängig. Bei kleineren Kavitäten kann eine Kompositfüllung ausreichend sein, sofern keine oder eine langsam voranschreitende Verfärbung des Zahnes besteht (Willershausen et al. 2002). Bei Zähnen mit größerem Substanzverlust oder stärkeren Verfärbungen kann das Problem nur mit einer Überkronung gelöst werden. Ist zudem nur noch eine geringe Restzahnschubstanz vorhanden, sollte der Zahn vor Aufnahme der Krone stabilisiert werden. In vielen Fällen ist hier ein adhäsiver Aufbau aus Komposit nach dem heutigen Kenntnisstand das Mittel der Wahl.

Bei stärker zerstörten Zähnen muss die Stabilisierung der Restzahnschubstanz jedoch mit Hilfe eines Wurzelstiftes oder eines Stift-Stumpfaufbaus erzielt werden. Dafür gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten hinsichtlich der Stiftform und des Stiftmaterials. Um eine übermäßige Schwächung der Wurzel zu vermeiden, sind vorzugsweise konische oder konisch-parallele Stifte zu verwenden, da sie den anatomischen Verhältnissen der Wurzel am nächsten kommen und, anders als bei parallelen Wurzelstiften, die Gefahr einer Wurzelfraktur geringer ist. Rein konische Stifte sind den parallelen Stiften im Retentionsverhalten in der Wurzel unterlegen. In Bezug auf die Stiftlänge wird eine Belassung der Wurzelfüllung im Apexbereich von 4 mm angestrebt, um eine dichte Versiegelung und ein geringes Frakturrisiko bei ausreichender Retention zu erhalten (Morgano 1996). Ein weiteres Kriterium für die Belastbarkeitssteigerung des Stiftaufbau-Kronen-Systems ist die Präparation einer ausgeprägten Hohlkehle oder Stufe im sogenannten „ferrule design“ („Fassreifen-Design“). Dies bedeutet, dass der zirkulär zu belassene Dentinmantel eine Höhe von mindestens 2 mm aufweisen sollte, um einen

stabilisierenden Effekt auf die Zahnwurzel zu bewirken (Sorensen und Engelmann 1990, Hemmings et al. 1991, Isidor et al. 1996).

Bei der Wahl des geeigneten Stiftmaterials treten neben funktionellen und mechanischen Überlegungen die ästhetischen Ansprüche immer mehr in den Vordergrund. Im sichtbaren Bereich, wo durch die Verwendung von vollkeramischen Kronen besonders ästhetische Ergebnisse erzielt werden sollen, ist ein metallisches Stift-Stumpfaufbau-System von Nachteil. So wird die Transluzenz im Kronenbereich beeinträchtigt und es können bläulich-graue Verfärbungen im Randbereich und unter dünneren Gingivaabschnitten im Verlauf der Wurzel entstehen, die durch Korrosionsprodukte der Legierungen oder durch die Metallfärbung an sich auftreten können (Zalkind und Hochmann 1998).

Als Alternative wurden zunehmend vollkeramische Stiftsysteme angeboten, die sich neben einer hohen Ästhetik auch durch ihre Biokompatibilität und Korrosionsfestigkeit auszeichnen (Eichner und Kappert 1996). Wie bei den Vollkeramiksystemen für Kronen existieren ebenso eine Reihe von Verfahren zur Herstellung vollkeramischer Stift-Stumpfaufbauten. So wurde beispielsweise versucht, aus den Glaskeramiken Dicor® (Fa. Dentsply International/Corning Glass Works) und IPS Empress® (Ivoclar Vivadent) individuelle Stift-Stumpfaufbauten über das Lost-Wax-Verfahren herzustellen (Kwiatkowski und Geller 1989, Herrmann 1996). Kern und Knode beschrieben 1991 zudem die Verwendung der sinterbaren Oxidkeramik In-Ceram® (Vita) als Gerüstmaterial für einteilige Stift-Stumpfaufbauten. Bei dieser Methode wird das Gerüst aus Aluminiumoxid als sogenannter Schlicker aufgetragen, gebrannt und anschließend mit einem Silikatglas infiltriert. Im klinischen Einsatz limitiert jedoch die geringe Bruchfestigkeit der eben beispielhaft für Glaskeramik und Oxidkeramik genannten Systeme deren Anwendung für Vollkeramikaufbauten (Kern et al. 1995, Leibrock et al. 1996).

Erst mit der Nutzung von Zirkondioxidkeramik besteht die Möglichkeit einer vollkeramischen Versorgung, die neben bester Biokompatibilität und Korrosionsbeständigkeit auch den mechanischen Ansprüchen genügt. Dabei sind die deutlich höhere Biegefestigkeit, ein vergleichsweise hoher Weibullmodul und höchste Risszähigkeit wesentliche Vorteile gegenüber anderen Keramiken. Reines Zirkondioxid (ZrO_2) besitzt drei temperaturabhängige Modifikationen der

Gitterstruktur (monoklin, tetragonal, kubisch) mit den entsprechenden Phasenumwandlungen. Da sich gezeigt hat, dass Zirkondioxid mit einem hohen Gehalt an tetragonaler Phase optimale mechanische Eigenschaften besitzt, wurde durch Zugabe von Yttriumoxid (Y_2O_3) eine Phasentransformationsfestigung durchgeführt (Gupta et al. 1977). Normalerweise wandelt sich die tetragonale Kristallstruktur bei Raumtemperatur in die monokline Kristallstruktur um. Dieses Zirkondioxid Y-TZP (TZP: Tetragonal Zirconia Polycrystals), teilstabilisiert durch Yttriumoxid in der tetragonalen Phase, wandelt sich auch bei Rissentstehung in die monokline Phase um. Diese Umwandlung ist durch eine Volumenzunahme von vier Prozent gekennzeichnet, wodurch die somit entstandene lokale Druckspannung eine weitere Rissausbreitung verhindert und eine dauerhafte Festigkeit erreicht wird (Marx 1993, Meyenberg et al. 1995).

Konfektionierte Wurzelstifte aus Zirkondioxid wie z.B. CosmoPost (Ivoclar Vivadent) oder Komet ER CeraPost (Brasseler) stehen für die Herstellung eines direkten oder indirekten Stumpfaufbaus zur Verfügung (Tschernitschek und Schwarze 2005). Eine Befestigung des Stiftes im Wurzelkanal mit anschließendem direkten Kompositaufbau ist möglich, aber auch die Herstellung einteiliger halbkonfektionierter Stift-Stumpfaufbauten (Koutayas und Kern 1999). Bei der letztgenannten Methode wird eine speziell entwickelte Zirkondioxid-Glaskeramik (IPS Empress® Cosmo Rohling, Ivoclar Vivadent) als individueller Stumpfaufbau an einen konfektionierten Zirkondioxidstift (CosmoPost, Ivoclar Vivadent) im Empress-Verfahren angepresst. Die Wärmeausdehnungskoeffizienten beider Keramiken liegen eng beieinander und sind Voraussetzung für eine hohe Passfähigkeit (Kappert 1996). Mit der zusätzlichen Verwendung einer entsprechenden Vollkeramik für die Herstellung der Krone, in diesem Fall Empress® 2-Keramik, entsteht ein aufeinander abgestimmtes, hochwertiges System.

Die Befestigung von keramischen Wurzelstiften bzw. Stift-Stumpfaufbauten kann einerseits mit der konventionellen Zementierung über Zinkoxidphosphat-Zement oder Glasionomerezement erfolgen. Dies hat eine mechanisch-retentive Verankerung zur Folge. Andererseits eignet sich auch die für Vollkeramik übliche adhäsive Befestigung mittels auto- und/oder lichtpolymerisierenden Befestigungskompositen, obwohl sich die Zirkondioxidoberfläche, anders als die

glaskeramischen Oberflächen, nicht durch Säuren wie Phosphor- oder Flusssäure anätzen lässt. Hierbei wird durch die Verwendung von Dentinadhäsiven eine chemische Verankerung zum Wurzeldentin und eine mechanische Verankerung zum Wurzelstift erreicht. Die Anwendung der Adhäsivtechnik ist bekanntlich besonders anfällig auf Verarbeitungsfehler und verlangt daher die strikte Einhaltung der Arbeitsrichtlinien, insbesondere die absolute Trockenlegung unter Kofferdam. Ist dies durch subgingival gelegene Präparationsbereiche nicht möglich, sollte die konventionelle Befestigungsmethode gewählt werden. Als Alternative zur aufwändigeren Adhäsivtechnik mit gleichwertigen Haft- und physikalischen Eigenschaften sowie einer einfachen Handhabbarkeit können die selbstadhäsiven Kompositbefestigungswerkstoffe angesehen werden.

Um bessere Hafteigenschaften von Zirkondioxidkeramik zum Befestigungswerkstoff zu erreichen, sind in der Literatur bereits einige Vorschläge zu Vorbehandlungsmaßnahmen der Oberfläche erwähnt. So ist z.B. das Korundstrahlen mit Al_2O_3 eine gängige Methode zur Aufrauung und Oberflächenvergrößerung (Stachniss et al. 2006, Palacios et al. 2006). Des Weiteren haben sich die Oberflächenkonditionierung mittels thermischer oder tribochemischer Silikatisierung und die Verwendung von Haftsilanen als effektive Methoden zur Steigerung des Haftverbundes zum Befestigungsmaterial und somit zur Stabilisierung der Gesamtrestauration erwiesen (Edelhoff und Sorensen 2002, Matinlinna et al. 2006).

Im Vergleich zu metallischen Stift-Stumpfaufbauten werden bei Anwendung von Zirkondioxidstiften zwar geringere Bruchfestigkeitswerte für das Kronen-Wurzelsystem erreicht, die Endwerte jedoch als ausreichend betrachtet (Fischer et al. 1998, Tschernitschek und Schwarze 2005). Für metallische und keramische Stiftsysteme werden in der Literatur nicht selten Wurzelfrakturen angegeben, wobei die jährlichen Misserfolgsraten von metallischen Stiftsystemen in Abhängigkeit von der Herstellungsmethode, dem Stiftdesign und dem Verhältnis Stift- zu Kronenlänge stark differieren (Weine et al. 1991, Creugers et al. 1993). Bedingt durch die Sprödigkeit der Zirkondioxidkeramik ist zudem die Gefahr eines Stiftbruches gegeben, was häufig die Extraktion des Zahnes nach sich zieht, da sich die Entfernung des Stiftfragmentes aus dem Kanal äußerst schwierig gestaltet.

Im Gegensatz dazu verfügen die Wurzelkanalstifte aus glasfaserverstärktem Komposit über einen dentinähnlichen E-Modul und wirken demzufolge durch eine gleichmäßige Kräfteverteilung über die gesamte Wurzelfläche einer Wurzelfraktur entgegen (Dean et al. 1998, Rosentritt et al. 2000). Im Fall eines Stiftbruches ergibt sich hier außerdem der Vorteil einer einfacheren Entfernbarkeit des Stiftes mit der Möglichkeit einer Neuversorgung des Zahnes. Überdies ist der ästhetische Gewinn durch diese zahnfarbenen Wurzelstifte in Verbindung mit einem direkten Stumpfaufbau unbestritten, so dass Glasfaserstifte in Zusammenhang mit der Adhäsivtechnik als vielversprechendes System gehandelt werden. Allerdings sind abschließende Bewertungen ohne die noch fehlenden Langzeitstudien, gerade in Bezug auf die Materialermüdung im Bereich zwischen Komposit und Dentin, nicht möglich.

3 Ziele der Arbeit

Beim klinischen Einsatz von CosmoPost-Stiften mit angepresstem Aufbau aus der IPS Empress® Cosmo-Keramik und anschließender Versorgung mit Vollkeramikkrone aus Empress® 2 traten Misserfolge auf. Dabei frakturierten die Stiftaufbauten im oberen Drittel des Wurzelkanals, also im Bereich des Übergangs vom angepressten Aufbau zum Stift. Diese Misserfolge waren Anlass für werkstoffkundliche Untersuchungen des verwendeten Stiftsystems, um die Ursachen herauszustellen und Verbesserungsmöglichkeiten aufzuzeigen. Aus diesem Grunde sollte die Belastbarkeit des Stiftsystems unter Berücksichtigung verschiedener Befestigungsmaterialien der Stift-Stumpfaufbauten und Kronen, unterschiedlicher Vorbehandlungsmöglichkeiten der Stifte und Herstellungsvarianten der Stumpfaufbauten überprüft werden. Zusätzlich interessierte der Verbund des Stiftes zum Befestigungsmaterial, um ihn durch geeignete Vorbehandlungen der Stifte zu optimieren. Es galt, die geeignetste Variante herauszufinden, um ein System mit höchsten Ansprüchen an Ästhetik, Biokompatibilität und Frakturverhalten zu erhalten.

4 Methodik

4.1 Verwendete Materialien

4.1.1 CosmoPost-Wurzelstifte

Der CosmoPost-Stift der Firma Ivoclar Vivadent ist ein parallelkonischer Zirkondioxid-Wurzelstift, bestehend aus dem Grundmaterial ZrO_2 -TZP BIO-HIP[®] Biokeramik der Firma Metoxit AG, Thayngen (CH). Die durch Yttrium-Stabilisierung erhaltene tetragonale Modifikation des Zirkoniumdioxids zeichnet sich durch extrem feine Korngrößen ($< 0,3 \mu\text{m}$) aus. Zudem werden die tetragonalen Zirkonia-Polykristalle (TZP) bei der Herstellung nach dem Pressvorgang heiß-isostatisch nachverdichtet (HIP = hot isostatic postcompaction), wodurch eine porositätenfreie Keramik entsteht. Die Oberfläche der Wurzelstifte ist vom Hersteller bereits durch Korund-Abstrahlung aufgeraut, so dass gemäß Verarbeitungsanleitung eine Vorbehandlung der Stifte in der Praxis oder im zahntechnischen Labor nicht erforderlich ist. Materialzusammensetzung und physikalische Eigenschaften sind in den Tabellen 1 und 2 aufgeführt. Der CosmoPost-Stift ist insgesamt 20,5 mm lang, wobei der parallelwandige Anteil eine Länge von 16 mm aufweist und der nach apikal mit 6° Konizität verlaufende Teil 4,5 mm lang ist. Die Stifte werden mit einem Durchmesser von 1,4 und 1,7 mm angeboten und können für direkte und indirekte individuelle Stift-Stumpfaufbauten genutzt werden. Den Durchmessern entsprechend werden die Kanalbohrer geliefert, die durch rote (1,4 mm) und schwarze (1,7 mm) Farbcodierung gekennzeichnet sind. Komplettiert wird das Sortiment durch einen Wurzeleröffner von 1,1 mm Durchmesser und den Abdruckstiften von 1,4 und 1,7 mm Durchmesser (Abb. 1).

Tabelle 1: Standardzusammensetzung des CosmoPost-Wurzelstiftes in Gew.-%

Verbindung	Gew. %
$\text{ZrO}_2 + \text{HfO}_2 + \text{Y}_2\text{O}_3$	> 99
Y_2O_3	4,5 - 5,4
HfO_2	< 5,0
Al_2O_3	< 0,5

Tabelle 2: Physikalische Eigenschaften des CosmoPost-Wurzelstiftes

Physikalische Größe	Einheit	Wert
Dichte	g/cm^3	> 6,0
Porösität	%	0
4-Punkt-Biegefestigkeit	N/mm^2	> 800
Ausdehnungskoeffizient	$\mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{K})$	$10,0 \pm 1,0$
mittlere Korngröße	μm	< 0,4
Druckfestigkeit	Mpa	2000
Vickershärte	HV	1200
Elastizitätsmodul	GPa	210
Bruchzähigkeit	$\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$	7
Verschleißverhalten	mm^3/h	< 0,002
Korrosionsbeständigkeit	$\text{mg}/(\text{m}^2\cdot 24\text{h})$	< 0,1
Oberflächenrauigkeit	μm	> 0,4 - 0,8



Abb. 1: CosmoPost-Sortiment zur Präparation und Weiterverarbeitung

4.1.2 IPS Empress® Cosmo Rohling

Der IPS Empress® Cosmo Rohling von Ivoclar Vivadent besteht aus zirkondioxidhaltiger IPS Empress®-Keramik, die aus werkstoffkundlicher Sicht auf den CosmoPost-Stift abgestimmt ist. Dieses Material ist für den individuellen indirekten Stumpfaufbau vorgesehen. Es wird dafür in einen durch Wachsausbrennen erhaltenen Hohlraum eingepresst und dabei mit dem CosmoPost-Stift verbunden. Dies geschieht bei 900 °C in einem speziell für das Empress®-System konfigurierten Pressofen. Die auf den Wärmeausdehnungskoeffizienten (WAK) der Wurzelstifte abgestimmte Glaskeramik der Aufbaumasse weist einen geringfügig kleineren Ausdehnungskoeffizienten als die Stifte auf (Tabellen 2 und 4). Zusammen mit dem hohen Anteil von 15 - 19 Gew.-% an Zirkondioxid (Tabelle 3) wird so im Heißpressverfahren ein Keramik-Keramik-Verbund zur TZP-Keramik des Stiftes erreicht, der vorwiegend auf Presspassung beruht. Zusätzliche chemische Anbindungen sind aufgrund der in beiden Keramiken enthaltenen Zirkondioxidanteile anzunehmen. Die REM-Aufnahmen in den Abbildungen 2 und 3 zeigen den Verbund zwischen Glaskeramik (Stumpfaufbau) und Zirkondioxid-Keramik (CosmoPost-Stift).

Tabelle 3: Standardzusammensetzung des Cosmo Rohlings in Gew.-%

Verbindung	Gew.-%
SiO ₂	54 - 59
ZrO ₂	15 - 19
Al ₂ O ₃	3 - 7
P ₂ O ₅	4 - 7
Li ₂ O	7 - 10
Na ₂ O	2 - 5
K ₂ O	3 - 7
F	0,5 - 2
Pigmente	0 - 2

Tabelle 4: Physikalische Eigenschaften des Cosmo Rohlings

Physikalische Größe	Einheit	Wert
Biegefestigkeit	N/mm ²	> 100
Chemische Löslichkeit	µg/cm ²	< 2000
Ausdehnungskoeffizient	µm/(m·K)	9,5 + 0,5
Transformationstemperatur	°C	545 +10

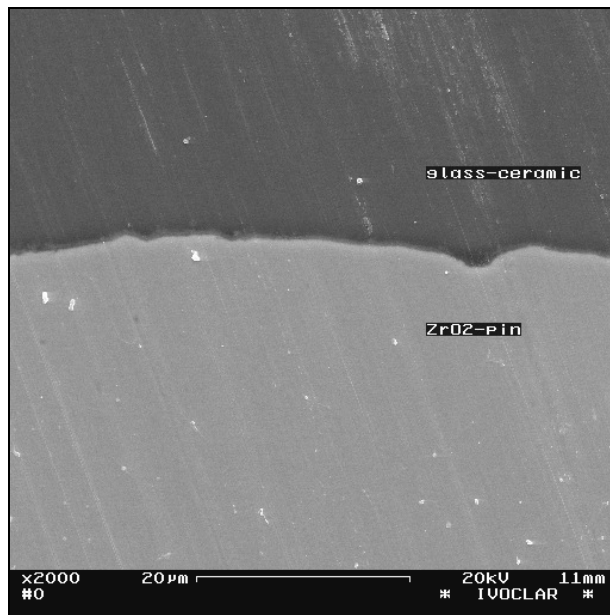


Abb. 2: REM-Aufnahme (2000-fach) Verbund CosmoPost-Stift und Cosmo Rohling-Aufbau

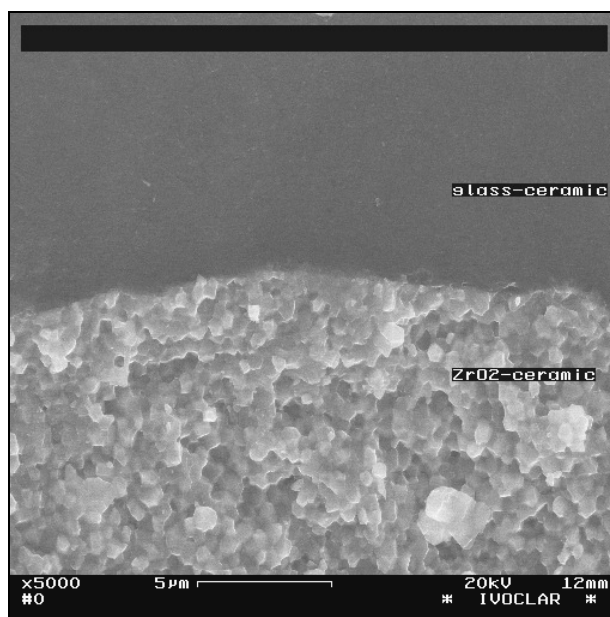


Abb. 3: REM-Aufnahme (5000-fach) Verbund CosmoPost-Stift und Cosmo Rohling-Aufbau

4.1.3 IPS Empress® 2-Schichttechnik: Rohlinge und Schichtmassen

Bei dem erweiterten IPS Empress® Heißpressverfahren (IPS Empress® 2-System) wird ausschließlich die Schichttechnik, die zwei verschiedene Materialien beinhaltet, angewendet. Beide Materialien, Gerüst- und Schichtmaterial, sind Glaskeramiken. Während es sich bei der Hauptkristallphase des Gerüstmaterials (IPS Empress® 2-Schichttechnik-Rohlinge) um Lithiumdisilikat handelt, werden die Schichtmaterialien (IPS Empress® 2-Schichttechnik-Schichtglaskeramik) als Fluorapatitglaskeramiken bezeichnet (Tabelle 5). Verantwortlich für die optischen und mechanischen Eigenschaften der Keramik sind die Größe, Verteilung und der Volumenanteil der Kristalle in der Restglasmatrix. Die physikalischen Eigenschaften der Keramiken sind in Tabelle 6 dargestellt. Für die hohe Biegefestigkeit der IPS Empress® 2-Gerüstkeramik von über 350 MPa ist ein hoher Volumenanteil der 0,5 bis 4 µm großen Lithiumdisilikatkristalle verantwortlich. Bei den IPS Empress® 2-Schichtmaterialien hingegen werden während des Kristallisationsprozesses Fluorapatitkristalle in geringem Volumenanteil ausgeschieden, um die optischen Eigenschaften wie Transluzenz, Helligkeit und Lichtstreuung zu verbessern. Beide Materialien in Kombination sollen optimale Ergebnisse in Ästhetik und Funktion erzielen.

Die Empress® 2-Schichttechnik-Rohlinge sind in zwei Größen erhältlich und können mit Dentin-, Schneide- und Transpamassen der Schichtkeramik verblendet werden. Des weiteren werden eine Korrekturmasse und spezielle Malfarben zur Charakterisierung der abschließenden Farbgestaltung angeboten.

Tabelle 5: Standardzusammensetzung der IPS Empress® 2-Schichttechnik-Keramiken in Gew. %

	IPS Empress® 2-Schichttechnik Rohlinge/Gerüst	IPS Empress® 2-Schichttechnik Schichtglaskeramik
Verbindung	Gew. %	Gew. %
SiO ₂	57,0 - 80,0	45,0 - 70,0
Al ₂ O ₃	0,0 - 5,0	5,0 - 22,0
La ₂ O ₃	0,1 - 6,0	-
MgO	0,0 - 5,0	-
ZnO	0,0 - 8,0	-
K ₂ O	0,0 - 13,0	3,0 - 9,0
Na ₂ O	-	4,0 - 13,0
F	-	0,1 - 2,5
Li ₂ O	11,0 - 19,0	-
P ₂ O ₅	0,0 - 11,0	0,5 - 6,5
CaO	-	1,0 - 11,0
Pigmente	0,0 - 8,0	0 - 3,0

Tabelle 6: Physikalische Eigenschaften der IPS Empress® 2-Schichttechnik-Keramiken

		IPS Empress® 2- Schichttechnik Rohlinge/Gerüst	IPS Empress® 2- Schichttechnik Glaskeramik
Physikalische Größe	Einheit	Wert	Wert
Biegefestigkeit	N/mm ²	350 ± 50	100 ± 25
Chemische Löslichkeit	mg/cm ²	< 100	< 100
Wärmeausdehnungskoeffizient (100 – 400 °C)	10 ⁻⁶ K ⁻¹ m/m	10,6 ± 0,5	9,7 ± 0,5
Transformationstemperatur	°C	535 ± 10	515 - 525 ± 10
K _{IC}	N/mm ² *√m	3,2 ± 0,3	-

4.1.4 FRC Postec®-Wurzelstifte

Die zylindrisch-konischen FRC Postec®-Wurzelstifte (Ivoclar Vivadent) gehören zu den glasfaserverstärkten Stiften, deren Fasern in eine Polymermatrix aus Urethandimethacrylaten und Triethylenglycoldimethacrylaten eingebettet sind. Um die Röntgenopazität zu gewährleisten, ist Ytterbiumtrifluorid hinzugefügt worden. Materialzusammensetzung und physikalische Eigenschaften der FRC Postec®-Stifte sind in den Tabellen 7 und 8 aufgeführt. Das Stiftsystem kann zur Herstellung von direkten und indirekten individuellen Stift-Stumpfaufbauten genutzt werden, wobei ein kraftschlüssiger Verbund von Stift zu Zahnhartsubstanz und Aufbaukomposit über die Adhäsivtechnik erreicht wird. Erhältlich sind die eine Konizität von 5°/18° aufweisenden Wurzelstifte in zwei Größen (Größe 1 = S, Größe 3 = M). In dieser Arbeit werden ausschließlich FRC Postec®-Stifte der Größe M verwendet, da diese für obere mittlere Frontzähne vorgesehen sind und den CosmoPost-Stiften mit 1,7 mm Durchmesser entsprechen. Auch bei diesem Stiftsystem können entsprechende Reamer und Abformstifte mitgeliefert werden. Die Verarbeitung von FRC Postec®-Stiften ist mit den bekannten und bewährten Befestigungs- und Aufbaukompositen möglich. Für diese Studie wurden als Befestigungskomposit Variolink® II und als Aufbaukomposit Tetric® Ceram (beide Ivoclar Vivadent) ausgewählt.

Tabelle 7: Standardzusammensetzung der FRC Postec®-Stifte in Gew.-%

Verbindung	Gew. %
Triethylenglycoldimethacrylat	7,6
Urethandimethacrylat	18,3
Hochdisperses Siliziumdioxid	0,9
Ytterbiumfluorid	11,4
Katalysatoren und Stabilisatoren	< 0,3
Glasfasern	61,5

Tabelle 8: Physikalische Eigenschaften der FRC Postec®-Stifte

Physikalische Größe	Einheit	Wert
Biegefestigkeit	N/mm ²	1390 + 17
Biegemodul	N/mm ²	45000 + 500
Wasseraufnahme	µg/mm ³	18 + 0,8
Wasserlöslichkeit	µg/mm ³	0,8 + 0,25

4.1.5 Tetric® Ceram

Tetric® Ceram ist ein zahnfarbenes Feinpartikel-Hybridkomposit von der Firma Ivoclar Vivadent, das sowohl im Front- wie auch im Seitenzahnbereich für adhäsive ästhetische Restaurationen eingesetzt werden kann. Der scheinbare Widerspruch einer guten Standfestigkeit eines Komposits und einer leichten Modellierbarkeit wird bei diesem Material durch so genannte Rheologie-Modifizier erreicht. Diese organisch modifizierten Schichtsilikate bilden unter Einwirkung von Scherkräften und durch Einbringung von Monomer eine dreidimensionale Netzwerkstruktur aus, die eine gute Verarbeitbarkeit zur Folge hat. Um eine höhere Verarbeitungsbreite zu erreichen, wurde ein Initiator-Stabilisator-System verwendet, das eine deutlich reduzierte Empfindlichkeit gegenüber OP-Leuchte und Umgebungslicht aufweist. Standardzusammensetzung und physikalische Eigenschaften des Tetric® Ceram-Komposits sind in den Tabellen 9 und 10 zusammengefasst.

Das röntgensichtbare und fluoridfreisetzende Tetric® Ceram ist in einer üblichen Farbpalette von Schmelz- und Dentinfarben mit zusätzlichen Bleach-Farben in Spritzen à 4 g und Cavifils à 0,25 g lieferbar. Die adhäsive Befestigung sollte mit dem von Ivoclar Vivadent für dieses System vorgegebenen Haftvermittler und Bonding, in diesem Fall mit dem Dentinhaftsystem Syntac Classic®, erfolgen.

Tabelle 9: Zusammensetzung von Tetric® Ceram in Gew.-%

Verbindung	Gew.-%
Bis-GMA	8,3
Urethandimethacrylat	7,6
Triethylenglycoldimethacrylat	4,3
Bariumglasfüller, silanisiert	50,6
Ytterbiumtrifluorid	17,0
Mischoxid, silanisiert	5,0
Ba-Al-Fluorosilikatglas, silanisiert	5,0
hochdisperses Siliziumdioxid, silanisiert	1,0
Additive	0,9
Katalysatoren	0,3
Pigmente	< 0,1

Tabelle 10: Physikalische Eigenschaften von Tetric® Ceram

Physikalische Größe	Einheit	Wert
Biegefestigkeit	N/mm ²	130
Biegemodul	N/mm ²	9400
Wasseraufnahme	µg/mm ²	21,5
Wasserlöslichkeit	µg/mm ²	1,0
Röntgenopazität	%Al	400
Durchhärtungstiefe	mm	> 4,5
Druckfestigkeit	N/mm ²	230
Vickershärte	N/mm ²	600
Transparenz HV 0,5/30	%	9 -16
Dichte	g/cm ³	2,25

4.1.6 Variolink® II-Befestigungskomposit/Dentinhaftsystm Syntac Classic®

Ebenfalls von der Firma Ivoclar Vivadent ist das röntgenopake, dualhärtende Kompositsystem Variolink® II, das zur adhäsiven Befestigung von indirekten Vollkeramik-, Ceromer- und Komposit-Restaurationen genutzt werden kann. Es ist speziell für die adhäsive Zementierung von IPS Empress® 2-Kronen und CosmoPost-Wurzelstiften vorgesehen und wurde in Verbindung mit dem Dentinhaftsystm Syntac Classic® in den Versuchen dieser Arbeit verwendet. Der Befestigungszement besteht aus zwei zu vermischenden Komponenten (Base/Katalysator), wobei der Katalysator in zwei Konsistenzen (dünnflüssig/dickflüssig) erhältlich ist. Im Rahmen dieser Studie wurde ausschließlich der dickflüssige Katalysator eingesetzt. In Tabelle 11 sind die Standardzusammensetzungen der verschiedenen Komponenten dargestellt.

Durch die Kombination aus lichtinduzierter und chemischer Selbsthärtung ist eine optimale Durchhärtungstiefe und Langzeitfestigkeit gegeben. Verschiedene Farbtöne und Transparenzabstufungen sollen eine gute Anpassung an die Restauration möglich machen.

Das System Syntac Classic®, ein Dentinadhäsiv-System der 4. Generation, besteht aus einem optionalen Schmelz/Dentinkonditionierer, einem Primer und

einer Bondingsubstanz (Adhäsiv). Eine zusätzliche Schmelzkonditionierung wurde bei der Befestigung der Empress 2-Kronen angewendet, während bei der Befestigung der CosmoPost-Stift-Stumpfaufbauten nur der Syntac-Primer, der als self-etching Primer auch die Konditionierung des Dentins übernimmt, zum Einsatz kam. Gemäß der Verarbeitungsanleitung wurde anschließend das zum System gehörende Adhäsiv und bei den Kronen zusätzlich Schmelzbonding verwendet.

Tabelle 11: Standardzusammensetzung von Variolink® II in Gew.%

	Variolink® II Base	Variolink® II Katalysator dick	Variolink® II Katalysator dünn
Verbindung	Gew.%	Gew.%	Gew.%
Bis-GMA	13,1	11,0	13,9
Urethandimethacrylat	6,6	5,5	7,0
Triethylglycolmethacrylat	6,6	5,5	7,0
Bariumglasfüller, silanisiert	38,4	42,2	36,2
Ytterbiumtrifluorid	25,0	25,0	25,0
Mischoxid, silanisiert	5,0	5,0	5,0
Ba-Al-Fluoro-Silikatglas	5,0	5,0	5,0
Katalysatoren und Stabilisatoren	0,3	0,8	0,9
Pigmente	< 0,1	< 0,1	< 0,1

4.1.7 Silikatisierungsverfahren

Silikatisierungs- bzw. Silanisierungsverfahren werden in der Zahnmedizin üblicherweise zur Verbesserung des Verbundes zwischen Metallen und Kunststoffen genutzt. Jedoch können auch Keramik- oder Kunststoffoberflächen durch diese Verfahren mit einer silikatischen Adhäsivschicht belegt werden, um Retentionsverbesserungen zu erreichen.

Für diese Arbeit wurden zur Silikatisierung der Wurzelstifte das Silicoater-Verfahren der Firma Heraeus Kulzer und das Rocatec®-Verfahren der Firma 3M Espe ausgewählt.

Das Silicoater-Verfahren ist ein flammenpyrolytisches Verfahren. Nach Korundstrahlung mit Al_2O_3 (250 μm , 3 bar) und Reinigen der Stiftoberfläche mit einer Essigsäureethylester-Lösung (Siliclean[®], Heraeus Kulzer) wird hierbei ein Luftstrom über eine silizium-organische Verbindung (Tetraethoxysilan) geführt. In der Flamme hydrolysiert und kondensiert das Alkoxysilan zu Silikatpartikeln, die auf der Oberfläche abgeschieden werden, so dass eine gleichmäßige SiO_2 -Schicht entsteht.

In einem zweiten Schritt wird ein hydrolysiertes Haftsilan (Methacryloxypropyltrimethoxysilan), in diesem Fall Siliseal[®] (Heraeus Kulzer), aufgetragen, das mit den OH-Gruppen der Siliziumschicht unter Kondensationsreaktionen an die SiO_2 -Schicht bindet. Das Silan stellt den Übergang zum organischen lichthärtenden Opaker dar, der in der weiteren Verarbeitung vor der Adaption des Kunststoffes aufgetragen wird.

Beim Rocatec[®]-Verfahren wird die silikatische Zwischenschicht durch einen tribochemischen Effekt aufgebracht. Hierbei wird die kinetische Energie von Strahlkörnern beim Korundstrahlprozess zum Aufschmelzen der Silikatschicht genutzt. Die Oberfläche wird zur Reinigung und Aufrauung zunächst in dem Feinstrahlgerät Rocatecor mit „Rocatec[®] Pre“ (Al_2O_3 , 110 μm , 2,5 bar) korundgestrahlt. Die eigentliche Beschichtung erfolgt mit dem siliziumdioxidmodifizierten Korund „Rocatec[®] Plus“. Durch die sehr hohen Temperaturen beim Aufprall der Körner verschmelzen diese zu einer geschlossenen Silikatschicht. Dieser Vorgang findet für 5 - 10 s im Rocatecor statt.

Zur Silanisierung wird anschließend ebenfalls ein Haftsilan aufgetragen, in diesem Fall abgestimmt auf das Rocatec[®]-System 3M ESPE Sil[®]. Für die weitere Verarbeitung mit Kunststoffen wird auch hier ein lichthärtender Opaker aufgetragen (Kapitel 4.1.8).

4.1.8 Opaker

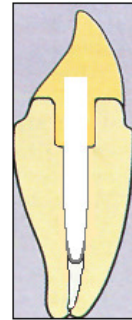
In den Versuchen dieser Arbeit wurde der lichthärtende Opaker Gradia der Firma GC verwendet. Mit einem Pinsel wird dieser gleichmäßig auf die Oberfläche aufgetragen und für 90 s im Polymerisationsgerät Dentacolor XS (Heraeus Kulzer) lichtgehärtet.

4.1.9 ZrO₂/TiO₂-Lösung

Für die Oberflächenkonditionierung der Wurzelstifte sollte unter anderem eine experimentelle Lösung verwendet werden. Diese Lösung besteht aus Zirkondioxid- und Titandioxid-Partikeln, welche zu insgesamt 5 % Massenanteilen neben dem Lösungsmittel Aceton enthalten sind. Die farblose Lösung wird auf die Oberfläche dünn aufgetragen, so dass eine Schichtstärke von ca. 100 nm entsteht, die für 4 min einer Temperaturbehandlung bei 200 °C unterzogen wird.

4.2 Versuche

4.2.1 Überprüfung der Bruchfestigkeit von Stift-Stumpfaufbauten in extrahierten Zähnen



Die folgenden Untersuchungen wurden an extrahierten Frontzähnen durchgeführt, die nach Extraktion in einer 0,1 %igen Thymollösung aufbewahrt wurden. Es handelte sich dabei um obere mittlere Inzisivi mit ähnlichem Kanallumen. Die Zähne wurden unter Wasserkühlung (50 ml/min) 2 mm oberhalb der Schmelz-Zement-Grenze dekapitiert, die Pulpa wurde entfernt und der Wurzelkanal mit Handinstrumenten bis ISO Größe 55 aufbereitet. Nach Desinfektion der Kanäle wurden die Wurzeln mit AH 26[®] (Dentsply De Trey) und Guttapercha mittels lateraler Kondensationstechnik gefüllt. Die Kanaleingänge wurden mit Glasionomerezement abgedeckt und die Zähne zum kompletten Erhärten des Füllmaterials für 24 Stunden erneut in Thymollösung gelagert. Dann wurden die Wurzelkanäle gemäß den Herstellerangaben zur Aufnahme der CosmoPost-Stifte vom Durchmesser 1,7 mm mit den entsprechenden Normbohrern aufbereitet. Die Länge der Aufbereitung, d.h. die Länge des Stiftes im Wurzelkanal betrug 10 mm. Das Anlegen des Kanalinlays erfolgte ebenfalls unter Wasserkühlung mit Hilfe eines abgerundeten, zylinderförmigen Diamanten vom Durchmesser 0,8 mm, der in 1,5 mm Tiefe um den Kanaleingang geführt wurde. Dabei wurde auf einen gleichmäßigen Substanzabtrag und auf eine Dicke des angrenzenden Dentinmantels von mindestens 1 mm geachtet.

Die Anfertigung der vollkeramischen Stift-Stumpfaufbauten erfolgte indirekt, d.h. es wurde mit einem mitgelieferten Abdruckstift der gleichen Größe eine

Silikonabformung (Doppelmischtechnik mit Panasil® putty und Panasil® contact plus der Fa. Kettenbach) durchgeführt. Nach Herstellung eines Teilmodells aus Superhartgips (Klasse IV) konnte der Aufbau an den konfektionierten Zirkondioxidstift CosmoPost modelliert werden. Um einen nahezu identischen Durchmesser des Aufbaus zu erreichen, wurde ein Silikonschlüssel als Modellierhilfe erstellt. Die Höhe der Modellation betrug 6 mm. Der Durchmesser richtete sich nach den individuellen Maßen der Wurzel und betrug durchschnittlich $4 \pm 0,6$ mm. Die Stiftaufbauten wurden nach Verarbeitungsanleitung angestiftet, eingebettet und im Keramikpressofen EP 500 aus Empress® Cosmo Rohlingen an den CosmoPost angepresst. Ebenfalls nach vorgegebenen Richtlinien erfolgte das Ausbetten und Abstrahlen der Gussobjekte, das Abtrennen der Gusskanäle mit einer diamantierten Trennscheibe und das Einpassen der Stift-Stumpfaufbauten auf das Modell. Zur Veranschaulichung sind in den Abbildungen 4 und 5 repräsentative Stift-Stumpfaufbauten auf einem Modell und mit der dazugehörigen Wurzel dargestellt. Die insgesamt 20 Stift-Stumpfaufbauten wurden in den entsprechenden Wurzeln befestigt. Dabei wurden 10 Aufbauten mittels Adhäsivtechnologie über das Variolink® II/Syntac Classic®-System und 10 konventionell mit schnellhärtendem Havard® Cement (Richter und Hoffmann) eingesetzt.

Zur Testung der Bruchfestigkeit der Wurzeln mit den vollkeramischen Stiftstumpfaufbauten wurde eine spezielle Haltevorrichtung angefertigt. Die Fixation der Zähne erfolgte mit dem Autopolymerisat Paladur® (Kulzer) bis 2 mm unter der Schmelz-Zement-Grenze. Auf eine Simulation der elastischen Verankerung der Zähne durch eine Ummantelung der Wurzeln mit dünnfließendem Silikon wurde verzichtet. Die Universalprüfmaschine vom Typ 1435 (Zwick) belastete die Stift-Stumpfaufbauten im Winkel von 135° zur Zahnachse auf der palatinalen Fläche mit einem planen Stempel bis zur Fraktur (Abb. 6). Die Vorschubgeschwindigkeit betrug 1 mm/min.



Abb. 4: Stift-Stumpfaufbauten auf Modell



Abb. 5: Stift-Stumpfaufbau

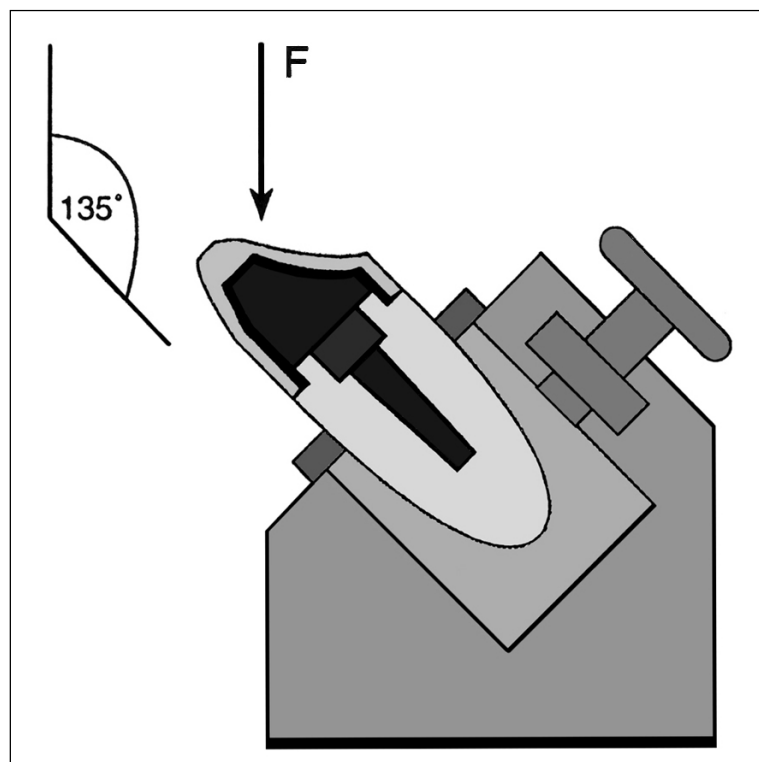


Abb. 6: Schematische Darstellung des Belastungswinkels

4.2.2 Überprüfung der Bruchfestigkeit von Stift-Stumpfaufbauten in extrahierten Zähnen mit Empress® 2- Kronen

In diesem Versuch wurden erneut für 20 weitere dekapitierte, wurzelgefüllte Zähne vollkeramische Stift-Stumpfaufbauten aus CosmoPost-Stiften und IPS Empress® Cosmo Rohlingen hergestellt. Die Stift-Stumpfaufbauten wurden in diesem Fall alle adhäsiv mit dem Variolink® II/Syntac Classic®-System in den Wurzeln befestigt. Zusätzlich sollten diese Zähne Kronen aus der IPS Empress® 2-Schichttechnik-Keramik erhalten. Für die Kronen wurde in Höhe der Schmelz-Zement-Grenze eine 1,2 mm breite Stufe mit abgerundeter Innenkante präpariert. Dabei wurde eine gleichmäßige zirkuläre Höhe von 2 mm zwischen Präparationsrand und Beginn des Stift-Stumpfaufbaus („ferrule design“) gewährleistet. Um eine einheitliche Größe der Kronengerüste zu gewährleisten, wurden die Gerüste mit Hilfe eines Silikonschlüssels in Wachs modelliert, angestiftet, eingebettet und aus dem Gerüstmaterial des IPS Empress® 2-Schichttechnik-Systems im Pressverfahren hergestellt. Nach dem Ausbetten und Abstrahlen der Gerüste wurden diese auf die Modelle aufgepasst und mit dem entsprechenden Schichtmaterial des IPS Empress® 2-Schichttechnik-Systems verblendet. Die Kronen wurden im Vita Vacumat® Ofen nach Herstellerangaben gesintert und anschließend vermessen, um eine einheitliche Schichtdicke des Verblendmaterials von 0,5 mm zu gewährleisten. Anschließend wurden die Kronen mit Glasurmasse beschichtet und erneut gebrannt.

Es folgte nun die Befestigung der IPS Empress® 2-Kronen auf unterschiedliche Weise. 10 Kronen wurden adhäsiv mit dem Variolink® II/Syntac Classic®-System befestigt und die anderen 10 konventionell mit Havard® Cement. Analog zum vorherigen Versuch wurden die Zähne mit Stift-Stumpfaufbauten und Kronen in der speziellen Haltevorrichtung fixiert und auf der Palatinalfläche bis zum Bruch belastet (Abb. 6). Die Haltevorrichtung für diesen Versuchsaufbau ist in Abbildung 7 dargestellt.

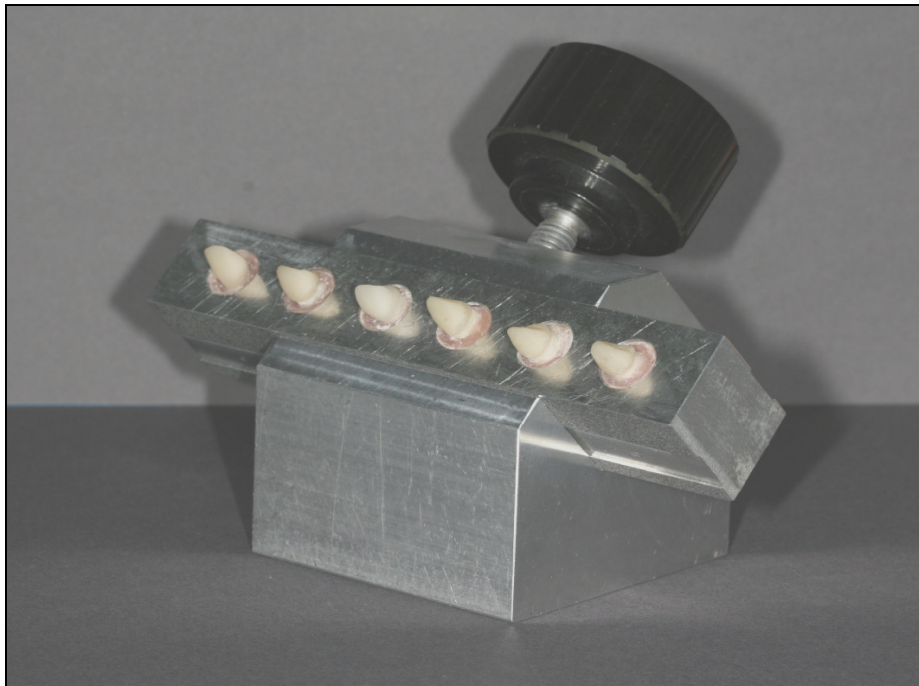


Abb. 7 : Versuchsaufbau zur Ermittlung der Bruchfestigkeit von Stift-Stumpfaufbauten mit und ohne Empress® 2-Kronen

4.2.3 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen

Zusätzlich zu den für die Bruchfestigkeit ermittelten Werten wurde die Frakturfläche visuell und rasterelektronenmikroskopisch beurteilt (Leica® Stereosan 260, Fa. Cambridge Instruments, GB).

Die Bruchstücke wurden zur Vorbereitung auf die Untersuchung im RE-Mikroskop mit Gold besputtert.

Im Detail sollten hier eventuelle Risse in der Wurzel, Absplitterungen vom Wurzeldentin sowie Charakteristika der Verbundfläche vom Keramikaufbau und CosmoPost-Stift zum Dentin aufgezeigt werden.

4.2.4 Untersuchungen zur Biegebruchfestigkeit (3-Punkt-Biegeversuch)

Mit Hilfe des 3-Punkt-Biegetests wurde die Bruchfestigkeit verschiedener Wurzelstifte überprüft. Zu den Stiften gehörten CosmoPost-Stifte mit einem Durchmesser von 1,7 mm, die einerseits wie vom Hersteller geliefert und andererseits auf 900 °C vorgewärmt verwendet wurden, glasfaserverstärkte Postec®-Stifte (Ivoclar Vivadent) mit entsprechendem Durchmesser (Größe M), Nichtedelmetallstifte aus Remanium® 2000 (Dentaurum) und Titanstifte (Biotitan von Schütz-Dental). Bei den individuell vom Zahntechniker hergestellten Metallstiften wurde darauf geachtet, dass die Ausmaße, d.h. Länge, Durchmesser und Form der zu vergleichenden Stifte, übereinstimmen. Als Vorlage wurde der CosmoPost-Stift mit einem Durchmesser von 1,7 mm verwendet, ein Silikonschlüssel hergestellt, die Stifte aus rückstandsfrei verbrennbarem Kunststoff modelliert und im entsprechenden Metall gegossen. Die Wärmebehandlung der CosmoPost-Stifte erfolgte analog zu den Herstellerangaben für Aufheiztemperaturen und Haltezeiten beim Pressvorgang für Stift-Stumpfaufbauten mit IPS Empress® Cosmo Rohlingen. Von jeder Stiftsorte wurden mindestens drei Exemplare für den Versuch verwendet. Die verschiedenen Wurzelstifte wurden, wie in Abbildung 8 schematisch dargestellt, mit Hilfe der Universalprüfmaschine vom Typ 1435 (Zwick) bis zum Bruch belastet.

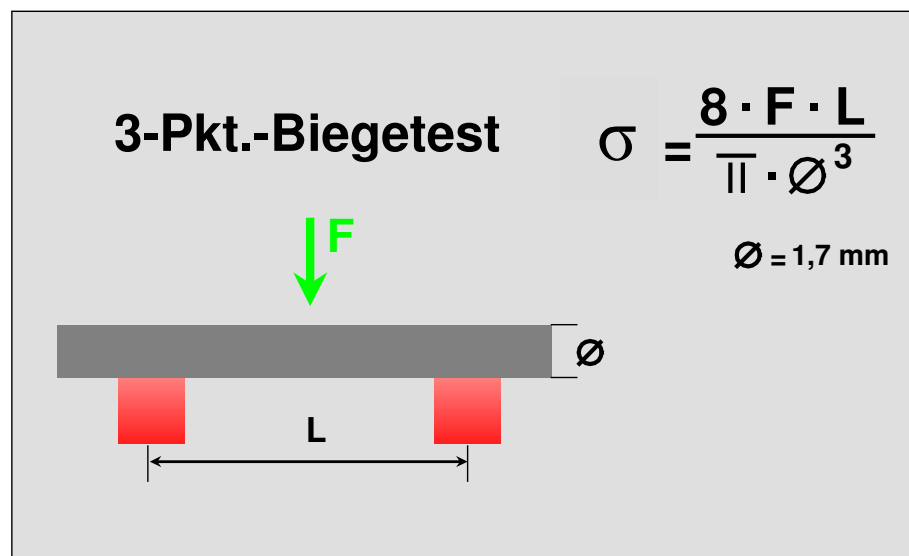
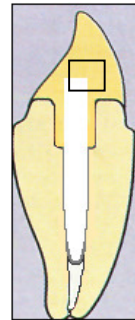


Abb. 8: Versuchsaufbau für 3-Punkt-Biegetest

4.2.5 Verbunduntersuchungen des CosmoPost-Stiftes zum Aufbaumaterial IPS Empress® Cosmo Rohling und Tetric® Ceram



Für die Anbringung des Stumpfaufbaus an den CosmoPost-Stift gibt es zwei Möglichkeiten. Zum einen die direkte Anmodellation eines Komposits oder zum anderen mittels der speziellen Glaskeramik IPS Empress® Cosmo Rohling über das Anpressverfahren der Firma Ivoclar Vivadent, wie bereits in Versuch 4.2.1 und 4.2.2 beschrieben. Für beide Varianten, den Komposit- und den Keramikaufbau, sollte der optimale Verbund zum CosmoPost-Stift untersucht werden. Zu diesem Zweck kamen verschiedene Oberflächenvorbehandlungen der Wurzelstifte zur Anwendung. Im Anschluss sollten Probekörper aus den unterschiedlichen Materialien an die vorbehandelten Stifte angebracht werden. Zu den Vorbehandlungen zählten die Konditionierungen der Stifte mit $\text{ZrO}_2/\text{TiO}_2$ -Lösung, Silikatisierung mit Hilfe des Silicoater- oder Rocatec®-Verfahrens, wie in Kapitel 4.1.7 beschrieben, und das Korundstrahlen mit Aluminiumoxid (Al_2O_3 , 110 μm , 2,5 bar). Im Falle der Anmodellation des Probekörpers aus dem Kompositmaterial Tetric® Ceram wurde das Auftragen von Opaker als zusätzliche Vorbereitung angewendet. Eine Gruppe von unbehandelten Stiften, bzw. wie vom Hersteller geliefert oder empfohlen, wurde in allen kommenden Versuchen als Referenz mit einbezogen.

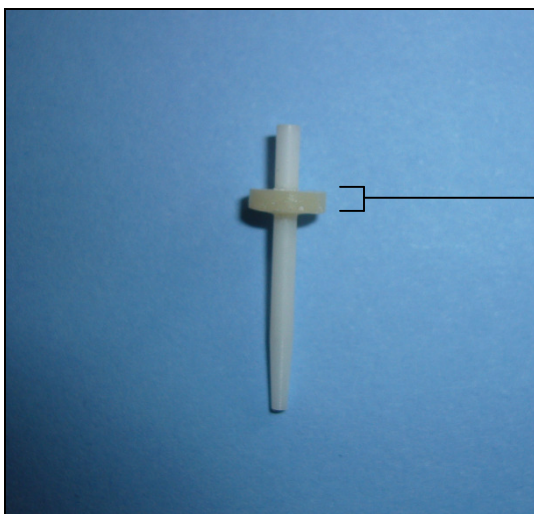
Für den Verbund CosmoPost-Stift mit IPS Empress® Cosmo Rohling ergaben sich dabei folgende Stiftvarianten:

- unbehandelt
- mit $\text{ZrO}_2/\text{TiO}_2$ -Lösung vorbehandelt
- mit Silicoater vorbehandelt
- korundgestrahlt

- korundgestrahlt und mit $\text{ZrO}_2/\text{TiO}_2$ -Lösung vorbehandelt
- korundgestrahlt und mit Silicoater vorbehandelt
- mit Rocatec vorbehandelt

Für den Verbund CosmoPost mit dem Komposit Tetric® Ceram ergaben sich entsprechend der Komposittechnologie im Verbund zu anderen Materialien abgewandelte Stiftvariationen:

- unbehandelt
- mit $\text{ZrO}_2/\text{TiO}_2$ -Lösung vorbehandelt
- mit Silicoater vorbehandelt
- korundgestrahlt
- korundgestrahlt und mit $\text{ZrO}_2/\text{TiO}_2$ -Lösung vorbehandelt
- korundgestrahlt und mit Silicoater vorbehandelt
- mit Rocatec vorbehandelt
- mit Silicoater vorbehandelt und Opaker aufgetragen
- korundgestrahlt und Opaker aufgetragen
- korundgestrahlt, mit $\text{ZrO}_2/\text{TiO}_2$ -Lösung vorbehandelt und Opaker aufgetragen
- korundgestrahlt, mit Silicoater vorbehandelt und Opaker aufgetragen
- mit Rocatec vorbehandelt und Opaker aufgetragen



Verbundhöhe des
Aufbaus: 1,5 mm

Abb. 9: Probekörper

In der Versuchsanordnung sollte ein zylinderförmiger Aufbau so an den Stift angebracht werden, dass die Verbundhöhe 1,5 mm und der Durchmesser ca. 5 mm betragen (Abb. 9). Die Verbundfläche ergibt sich aus der Formel $A = \text{Höhe} \times \pi \times \text{Durchmesser des Stiftes}$ (1,7 mm) und beträgt demnach 8 mm². Für die Herstellung der Probekörper für die indirekte Methode mit dem IPS Empress® Cosmo Rohling und die direkte Methode mit dem Komposit Tetric® Ceram wurde eine entsprechende Vorlage aus Wachs modelliert und auf die angegebenen Maße reduziert und geglättet. Mit knetbarem Silikon wurde ein Schlüssel hergestellt, so dass die nun folgenden Probekörper in identischen Ausmaßen aus Wachs bzw. aus Komposit angefertigt werden konnten. Die Stifte wurden nun den für die beiden Versuchsgruppen unterschiedlich angegebenen Vorbehandlungen unterzogen und entsprechend gereinigt.

Das Korundstrahlen erfolgte mit Al₂O₃ der Körnung 100 µm bei einem Druck von 2,5 bar. Darauf folgte eine Reinigung der Stifte mit dem Dampfstrahlgerät, bevor die Adaption des Wachses bzw. Komposits erfolgte.

Die Konditionierung der Stifte durch die Silikatisierungsverfahren Silicoater und Rocatec® beinhaltet, wie in Kapitel 4.1.7 beschrieben, die eigentliche Silikatisierung der Oberfläche und die anschließende Silanisierung mit einem Haftsilan. Die Vorgehensweisen wurden nach Herstellerangaben durchgeführt.

Die Verwendung der Experimentierlösung ZrO₂/TiO₂-Lösung erfolgte wie bereits in Kapitel 4.1.9 angegeben. Auch der lichthärtende Opaker wurde in der angeführten Weise mit einem Pinsel aufgetragen und für 90 s im Dentacolor XS-Gerät (Heraeus Kulzer) lichtgehärtet.

Danach wurde jeder Stift so in dem Silikonschlüssel platziert, dass der anzumodellierende Teil im oberen parallelen Drittel des Stiftes lag. Mit einer Schieblehre ist nach jedem individuellen Aufwachsen bzw. Auftragen und Aushärten des Komposits die Parallelität und die Dicke, d.h. die Länge der Verbundfläche nachgemessen worden. Die in Wachs modellierten Probekörper für das indirekte Verfahren wurden nach den Richtlinien der Empress®-Verarbeitungsanleitung mit einem 2 mm dicken Wachsdraht (Rund-Wachsprofil) versehen und auf den Kunststoffmuffelsockel aufgebracht. Der Wachsdraht wurde an der Verbundstelle zum Probekörper etwas verjüngt, so dass ein fließender

Übergang entstand. Zudem wurde der Wachsdraht mit einer Länge von 10 mm und den Richtlinien entsprechend in einem 45° - Winkel am Probekörper befestigt. Danach konnte die Klebemanschette um den Sockel gelegt und die Muffel mit Empress® 2-Spezialeinbettmasse aufgefüllt werden. Die Konzentration und Menge der zugegebenen Einbettmasse-Flüssigkeit ergab sich aus der Arbeitsanleitung. Nach vollständiger Erhärtung und Abkühlung wurde die Muffel entsprechend der Aufheiztemperaturen und Haltezeiten vorgewärmt, bis der Pressvorgang mit dem vorgegebenen Presskolben (AlOx-Kolben) und der durch Erwärmen zähfließenden Keramik im Pressofen EP 500 durchgeführt wurde. Nach entsprechender Abkühlungsphase der Muffel konnte zur Entfernung des Presskolbens zuerst ein Abtrennen der Einbettmasse, nach Anzeichnung der Länge des Kolbens, mit Hilfe einer Trennscheibe erfolgen. Zur darauffolgenden Ausbettung der Pressobjekte wurde ein Glanzstrahlmittel genutzt, welches zur Grobausbettung mit 4 bar und zur Feinausbettung mit 2 bar Druck angewendet wurde. Danach wurde mit einer diamantierten Trennscheibe der Gusskanal entfernt und die Überschüsse mit einem Diamanten verschliffen, ebenso kleinere Gussperlen und Pressfahnen. Nach erneuter Kontrolle der Ausmaße der einzelnen Probekörper mit Hilfe der Schieblehre konnten die Objekte für den weiteren Versuchsaufbau genutzt werden.

Mit Hilfe der Universalprüfmaschine 1435 (Zwick) wurde die Druck-Scherfestigkeit wie folgt ermittelt. Über den senkrecht auf einer Stahlplatte stehenden Stift – der parallele Teil des Stiftes mit dem Aufbau befand sich auf der unteren Seite – wurde ein angepasster Hohlzylinder aus Stahl geführt, der eine größtmögliche Auflagefläche auf dem Aufbau und gleichzeitig ein einwandfreies Überschieben des Zylinders über den Stift ermöglichte. Um einen sicheren Stand der Proben zu garantieren, wurde eine spezielle Fixationsvorrichtung hergestellt. Mittels Universalprüfmaschine wurde nun der Aufbau vom Stift bis zum Bruch abgedrückt, wie schematisch in Abbildung 10 dargestellt. Aus der dabei gemessenen Kraft, bezogen auf die Fläche wurde die Druck-Scherfestigkeit ermittelt.

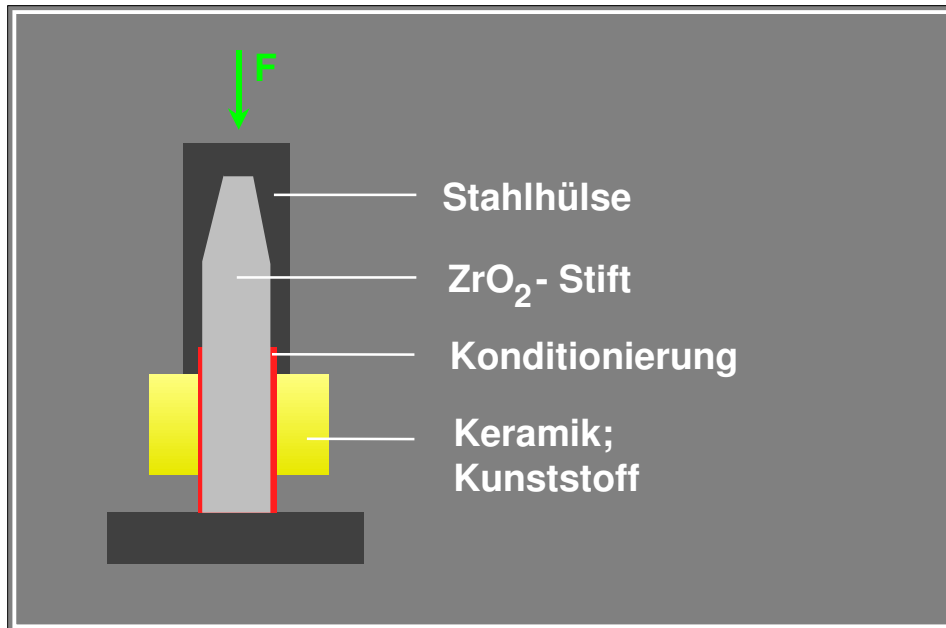


Abb. 10: Versuchsaufbau für Scherkraftuntersuchungen mit Probekörpern

4.2.6 Verbunduntersuchungen des CosmoPost-Stiftes zum Aufbaumaterial IPS Empress® Cosmo Rohling und Tetric® Ceram nach Thermozyklierung

Um die Druck-Scherfestigkeit auch nach künstlicher Alterung zu überprüfen, wurden die Probekörper an den verschiedenen vorbehandelten CosmoPost-Stiften 25.000 Temperaturlastwechseln zwischen einem 5°C kalten und einem 60°C warmen Wasserbad unterzogen (Abb. 11). Jeder Zyklus umfasste jeweils eine halbe Minute Verweildauer in den Bädern (15 sec 5°C, 15 sec 60°C).

Für CosmoPost-Stifte mit angepresstem IPS Empress® Cosmo Rohling wurden die folgenden zwei Vorbehandlungsvarianten ausgewählt und künstlich gealtert:

- unbehandelt
- korundgestrahlt und mit Silicoater vorbehandelt

Für die CosmoPost-Stifte mit Kompositaufbau ergaben sich die folgenden sechs Gruppen:

- unbehandelt
- mit $\text{ZrO}_2/\text{TiO}_2$ -Lösung vorbehandelt
- korundgestrahlt und mit $\text{ZrO}_2/\text{TiO}_2$ -Lösung vorbehandelt
- korundgestrahlt und mit Silicoater vorbehandelt
- korundgestrahlt, mit $\text{ZrO}_2/\text{TiO}_2$ -Lösung vorbehandelt und Opaker aufgetragen
- korundgestrahlt, mit Silicoater vorbehandelt und Opaker aufgetragen

Die Probekörperanzahl pro Vorbehandlungsart betrug mindestens fünf.

Im Anschluss an den Temperaturlastwechsel wurde gemäß der unter Versuch 4.2.5 genannten Versuchsanordnung die Druck-Scherfestigkeit über die benötigte Kraft beim Abdrücken des Aufbaus ermittelt.

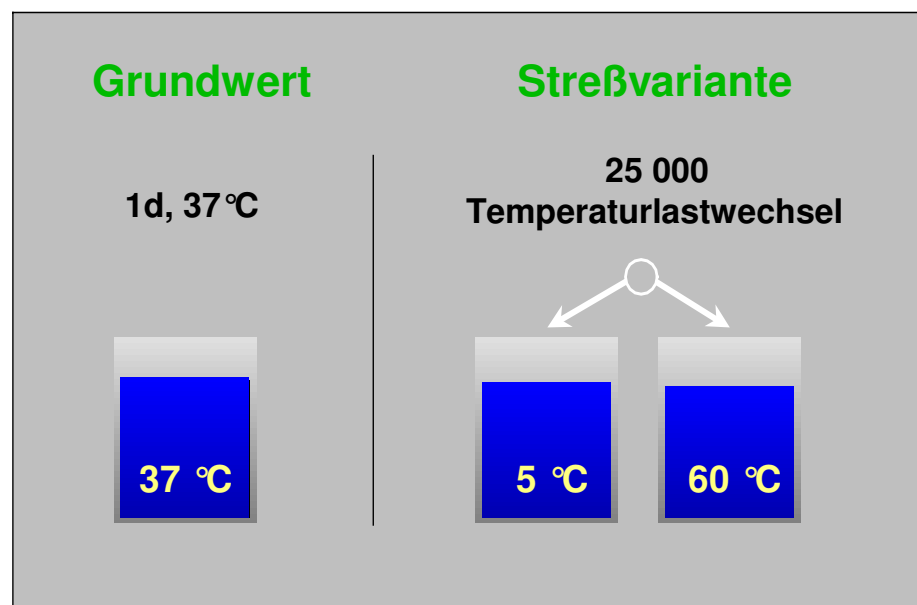


Abb. 11: Temperaturlastwechsel

4.2.7 Verbunduntersuchungen von FRC Postec®-Stiften mit dem Aufbaumaterial Tetric® Ceram

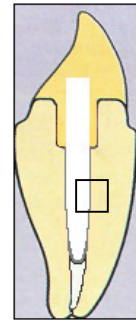
Um dem Trend nach glasfaserverstärkten Wurzelstiften gerecht zu werden, wurde der FRC Postec®-Stift der Firma Ivoclar Vivadent in diese Arbeit mit einbezogen. Analog zu den vorherigen Versuchen mit Probekörpern wurden die gleiche Versuchsanordnung und die gleichen Maße des anmodellierten Aufbaus verwendet. Da jedoch die Stiftform des FRC Postec®-Stiftes nicht exakt mit der des CosmoPost-Stiftes übereinstimmt, wurde für diesen Versuch ein neuer Silikonschlüssel hergestellt. Das Komposit Tetric® Ceram wurde dabei an den Stift ebenfalls im oberen Drittel anmodelliert und lichtgehärtet. Die Stückzahl der Probekörper pro Vorbehandlungsgruppe betrug ebenfalls fünf.

In diesem Fall ergaben sich folgende Stiftvariationen:

- unbehandelt
- korundgestrahlt und Auftragen von Haftsilan
- korundgestrahlt, Auftragen von Haftsilan und Opaker

Das Korundstrahlen erfolgte bei den FRC Postec®-Stiften nur mit dem feineren Korund (50 µm Korngröße) und mit geringerem Druck (1,5 bar) als bei den CosmoPost-Stiften, um einen erhöhten Substanzabtrag der Stifte zu vermeiden.

4.2.8 Verbunduntersuchungen von CosmoPost- und FRC Postec®-Stiften mit dem Befestigungsmaterial Variolink® II im Vergleich



Um den Verbund von beiden Stiftarten zu einem im Wurzelkanal verwendeten Befestigungsmaterial zu untersuchen, wurde das dualhärtende Befestigungskomposit Variolink® II verarbeitet. Hierzu wurden die drei besten Vorbehandlungsvarianten aus den vorherigen Versuchen für die CosmoPost-Stifte im Verbund mit dem Komposit Tetric® Ceram gewählt. Für die FRC Postec®-Stifte wurden drei Varianten als Grundlage genommen, die den klinischen Vorgehensweisen entsprechen. Es wurden je fünf Stifte entsprechend vorbehandelt und nach Arbeitsanleitung mit einem Variolink® II-Aufbau versehen. Die Maße des zylinderförmigen Aufbaus entsprachen wiederum denen aus den vorherigen Versuchen.

Folgende Vorbehandlungen wurden für die CosmoPost-Stifte ausgewählt:

- korundgestrahlt und mit $\text{ZrO}_2/\text{TiO}_2$ -Lösung vorbehandelt
- korundgestrahlt, mit Silicoater vorbehandelt und Opaker aufgetragen
- mit Rocatec vorbehandelt und Opaker aufgetragen

Für die FRC Postec®-Stifte ergaben sich folgende Vorbehandlungen:

- unbehandelt
- Applikation von Monobond S (wie vom Hersteller Ivoclar Vivadent empfohlen)
- Silikatisierung und Auftragen von Opaker

Mit Hilfe der Universalprüfmaschine wurde erneut die Abdruckkraft gemessen und daraus die Druck-Scherfestigkeit ermittelt.

4.3 Statistik

Da von einer Normalverteilung der Daten nicht ausgegangen wurde, erfolgte die Analyse der Daten mittels nichtparametrischer Tests. Hierbei kamen der H-Test nach Kruskal und Wallis und der Mann-Whitney-U-Test zur Anwendung. Der H-Test nach Kruskal und Wallis wurde zur Auswertung von mehr als zwei unabhängigen Stichproben genutzt, um pauschal eine Signifikanz zwischen den Gruppen einer Versuchsreihe nachzuweisen. Der Mann-Whitney-U-Test wurde zur Überprüfung auf Gleichheit von nur zwei unabhängigen Stichproben verwendet. Das Signifikanzniveau hierfür wurde mit $p \leq 0,05$ festgelegt, d.h. p-Werte die kleiner gleich 0,05 waren, zeigten statistisch signifikante Unterschiede an. Wurde vor der Auswertung der Daten mittels Mann-Whitney-U-Test der H-Test nach Kruskal und Wallis angewendet, veränderten sich die Signifikanzschranken gemäß der α -Adjustierung des Holm-Shaffer-Verfahrens. Bei alleiniger Anwendung des Mann-Whitney-U-Tests mit mehreren Stichprobengruppen in einer Versuchsreihe wurde auf die α -Adjustierung des Holm-Verfahrens zurückgegriffen, welches die Anzahl der Stichprobengruppen der jeweiligen Versuchsreihe berücksichtigte und den p-Wert herabsetzte.

5 Ergebnisse

5.1 Bruchfestigkeit von CosmoPost/IPS Empress® Cosmo Rohling Stift-Stumpfaufbauten

Für die Bruchfestigkeitswerte der Stift-Stumpfaufbauten aus dem CosmoPost/IPS Empress® Cosmo Keramik-System konnte für die verschiedenen Befestigungsmöglichkeiten kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Bei den konventionell mit Harvard Cement eingegliederten Aufbauten betrug die Bruchfestigkeit $302,3 \pm 45,6$ N und bei den adhäsiv mit Variolink® II im Wurzelkanal befestigten Aufbauten $321,9 \pm 41,9$ N. Die Mittelwerte sind in Diagramm 1 dargestellt. Auch in Bezug auf das Bruchmuster verhielten sich beide Versuchsgruppen ähnlich. Charakteristisch war dabei, dass der Bruch immer im Bereich des Kanaleingangs am Übergang vom CosmoPost-Stift zum angepressten Aufbau zu finden war und/oder der Stift selbst brach (Abb. 12). Die Bruchfläche am CosmoPost war immer glatt, während sie zum Dentin eine rauere Oberfläche aufwies.



Abb. 12: Frakturierte Stift-Stumpfaufbauten

5.2 Bruchfestigkeit von CosmoPost/IPS Empress® Cosmo Rohling Stift-Stumpfaufbauten mit IPS Empress® 2-Kronen

Für die folgende Versuchsanordnung wurde die adhäsive Befestigung der Stift-Stumpfaufbauten mit dem Befestigungskomposit Variolink® II in Kombination mit dem Syntac Classic®-System gewählt. Die IPS Empress® 2-Kronen wurden analog zum ersten Versuch entweder konventionell mit Harvard Cement oder adhäsiv mit Variolink® II/Syntac Classic® eingesetzt. Nach Belastung der Kronen bis zum Bruch zeigte sich erneut ein ähnliches Bruchmuster wie bei den Stift-Stumpfaufbauten ohne weitere Versorgung. Bei konventioneller Befestigung der Kronen konnte keine Erhöhung der Bruchfestigkeit im Vergleich zu den adhäsiv oder konventionell im Wurzelkanal befestigten Stift-Stumpfaufbauten ohne Kronenversorgung festgestellt werden. Die Werte für diese Versuchsgruppe betrugen $291,4 \pm 52,2$ N. Dagegen führte die adhäsive Befestigung der Kronen zu einem signifikanten Anstieg der Bruchfestigkeit des Systems im Vergleich zu den nicht mit Kronen versorgten Stift-Stumpfaufbauten. Die Werte dazu lagen bei $396,9 \pm 103,4$ N. Vergleicht man die unterschiedlichen Kronenbefestigungen, so konnte zwischen adhäsiver und konventioneller Befestigungsart ebenfalls ein signifikanter Unterschied festgestellt werden. In Abbildung 13 sind die Bruchfestigkeitswerte der verschiedenen Gruppen veranschaulicht.

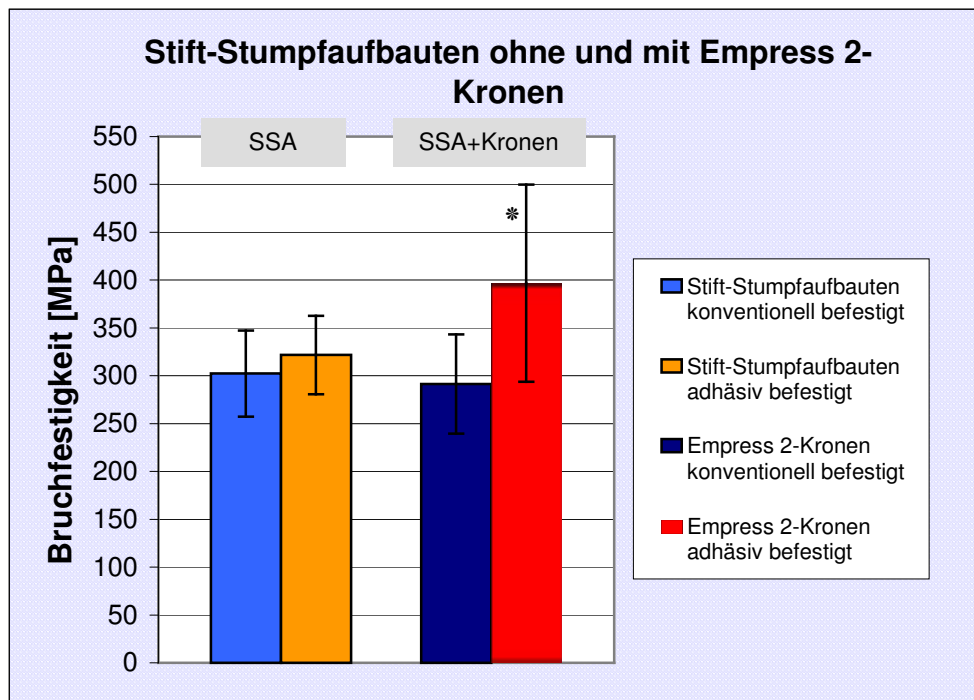


Abb. 13: Bruchfestigkeit von Stift-Stumpfaufbauten mit und ohne Empress[®] 2-Kronen nach unterschiedlicher Befestigung

* = signifikanter Unterschied ($p \leq 0,05$)

5.3 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen

Wie auch schon visuell bewertet, konnte rasterelektronenmikroskopisch nachgewiesen werden, dass der Bruch an der schwächsten Stelle stattfand, d.h. am Übergang vom angespressten Aufbau zum CosmoPost-Stift. Einige Absprengungen der Presskeramik mit teilweise anhaftenden Restpartikeln an Stift und Wurzelrest konnten ebenfalls erkannt werden. Auch wurden einige Wurzelfrakturen festgestellt, die alle im oberen Drittel der Wurzel verliefen. Komplette Wurzelfrakturen konnten nicht nachgewiesen werden. Die Bruchfläche der CosmoPost-Stifte stellte sich immer als glatt heraus. Die folgenden Abbildungen 14 und 15 zeigen Beispiele der Bruchflächen einer Stiftaufbauinnenseite und eines Wurzelrestes bei konventioneller Befestigung des Stift-Stumpfaufbaus. Der glatte Bruch des CosmoPost-Stiftes ist deutlich zu erkennen und es zeigen sich zudem Anteile des gebrochenen Stumpfaufbaus, welche am Wurzelrest haften blieben. Die abgeplatzen Bruchflächen des Stiftaufbaus

erscheinen ebenfalls glatt. Die Zementschicht ist als raue Auflagerung an der Oberfläche des Stumpfaufbaus in Abbildung 15 sichtbar. Die Wurzelfläche hingegen erscheint glatt und ohne Zementreste. In Abbildung 14 sieht man zusätzlich eine Wurzelfraktur, die klinisch betrachtet im oberen Drittel der Wurzel verlief.

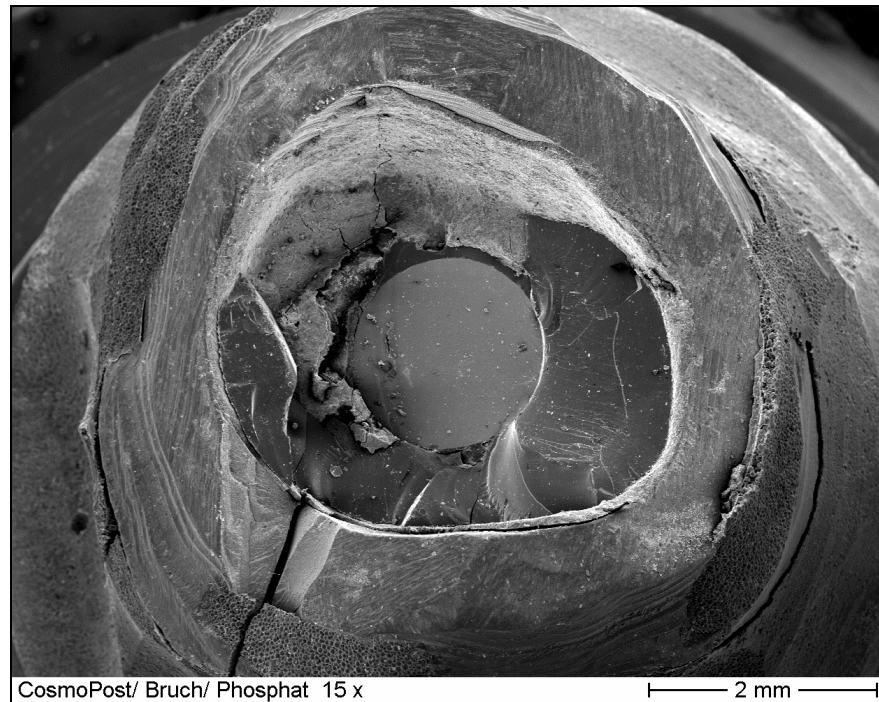


Abb. 14: Bruchfläche der Wurzel bei konventioneller Befestigung

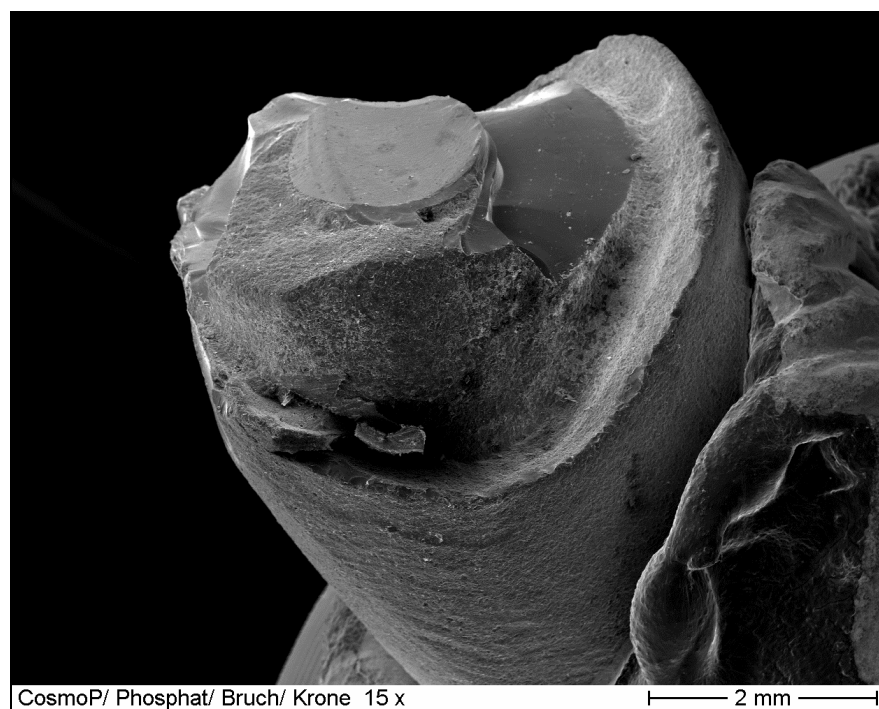


Abb. 15: Bruchfläche des Stumpfaufbaus bei konventioneller Befestigung

In den Abbildungen 16 und 17 stellen sich die Bruchflächen bei adhäsiver Befestigung des Stift-Stumpfaufbaus dar. Hier ist ebenfalls zu erkennen, dass ein Teil des Stiftaufbaus herausgebrochen ist und an der Wurzeloberfläche haftet. Die Bruchfläche ist ebenso glatt wie die des gebrochenen CosmoPost-Stiftes. Als homogene Schicht sieht man das adhäsive Befestigungsmaterial um den Stiftrest herum (Abb. 16) und als relativ glatte Auflagerung an der Stumpfaufbaufläche in Abbildung 17. Die Flächen erscheinen im Vergleich zu den vorherigen Bildern der konventionellen Befestigung generell glatter.

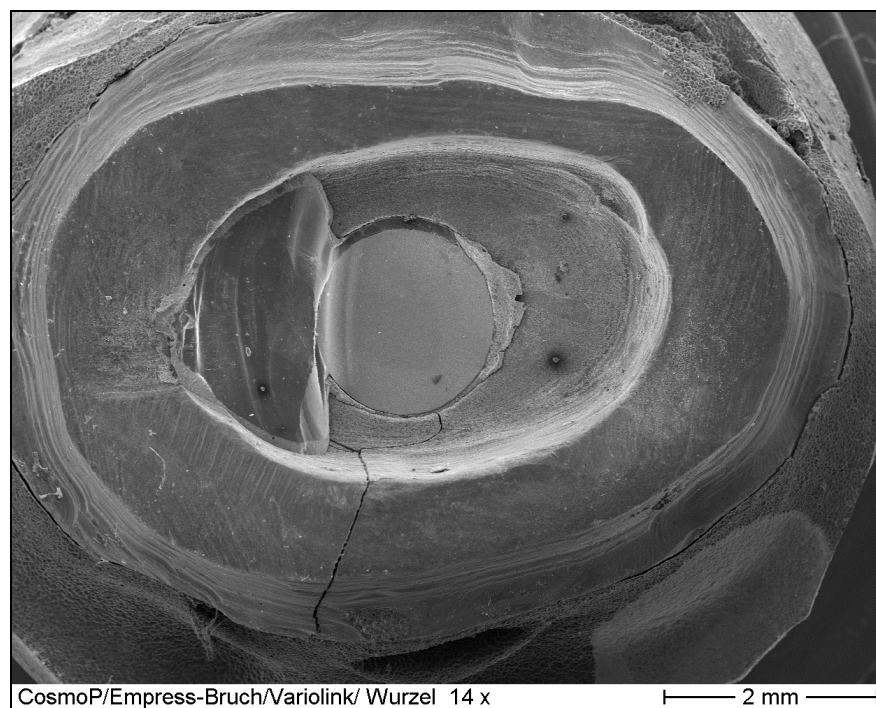


Abb. 16: Bruchfläche der Wurzel bei adhäsiver Befestigung

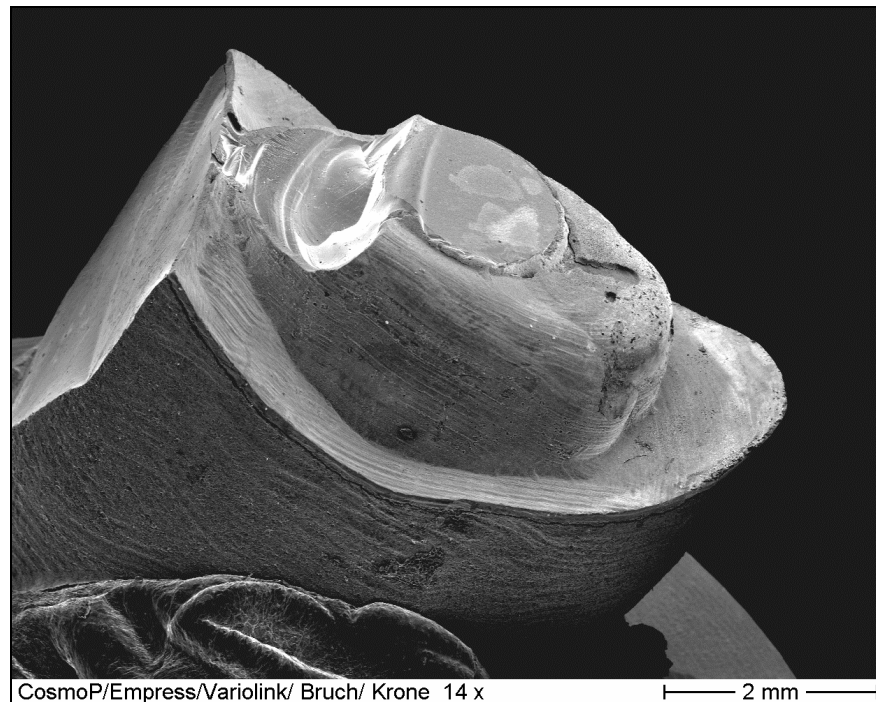


Abb. 17: Bruchfläche des Stumpfaufbaus bei adhäsiver Befestigung

5.4 Untersuchungen zur Biegebruchfestigkeit (3-Punkt-Biegeversuch)

Dieser Versuch erfolgte nicht nach einem DIN-Verfahren, da es sich bei den verschiedenen Stiften nicht um genormte einheitliche Prüfkörper handelte, sondern um in der Praxis angewendete Wurzelstifte, die je nach Material in der Form etwas differierten und teilweise individuell hergestellt wurden. Die folgenden Bruchfestigkeitswerte sind in Abbildung 18 zusammengefasst.

Beim 3-Punkt-Biegetest gingen die CosmoPost-Stifte (1,7 mm Durchmesser) bei 1168 ± 76 MPa zu Bruch. Mit einer Dehnung von nur etwa 1 % zeichneten sie sich durch eine hohe Sprödigkeit aus, so dass der für Zirkondioxid-Stifte bezeichnende Sprödbbruch mit glatter Bruchfläche bestätigt wurde. Wurden die CosmoPost-Stifte einer Wärmebehandlung unterzogen, wie es beim Anpressen der IPS Empress® Cosmo-Keramik im EP 500-Brennofen der Fall ist, kam es zu keiner wesentlichen Veränderung der erzielten Werte. Sie betrugen 1092 ± 52 MPa.

Der glasfaserverstärkte FRC Postec®-Stift mit einem Mittelwert von 1145 ± 14 MPa zeigte in etwa die gleiche Biegefestigkeit wie der CosmoPost-Stift. Dieser Wert ergab sich hier mit automatischem Beenden des Versuches, sobald der

Widerstand vermindert war. Im Falle der FRC Postec®-Stifte war kein definierter Bruch zu erkennen, sondern eine Weißfärbung der Belastungsstelle, bedingt durch das Reißen der Glasfasern (Abb. 20). Das Dehnungsverhalten der Glasfaserstifte liegt bei 5 % und ist somit deutlich höher als das der Zirkondioxid-Stifte. CosmoPost- wie auch FRC Postec®-Stifte zeigten laut Spannungs-Dehnungsdiagramm (Abb. 19) eine elastische, jedoch keine plastische Verformbarkeit.

Für den Titan-Stift wurde ein Wert von 1882 ± 30 MPa ermittelt, dieser zeigte jedoch schon bei 1200 MPa eine extreme plastische Verformung, die sich in einer Dehnung von insgesamt 30 % widerspiegelt.

Die höchste Biegefestigkeit erreichten die Nichtedelmetall-Stifte aus Remanium® 2000 mit 2333 ± 114 MPa bei einer Dehnung von ca. 7 % und einer geringen plastischen Verformung.

Die Bruchmuster bzw. Formveränderungen der unterschiedlichen Stiftarten sind in Abbildung 20 dargestellt.

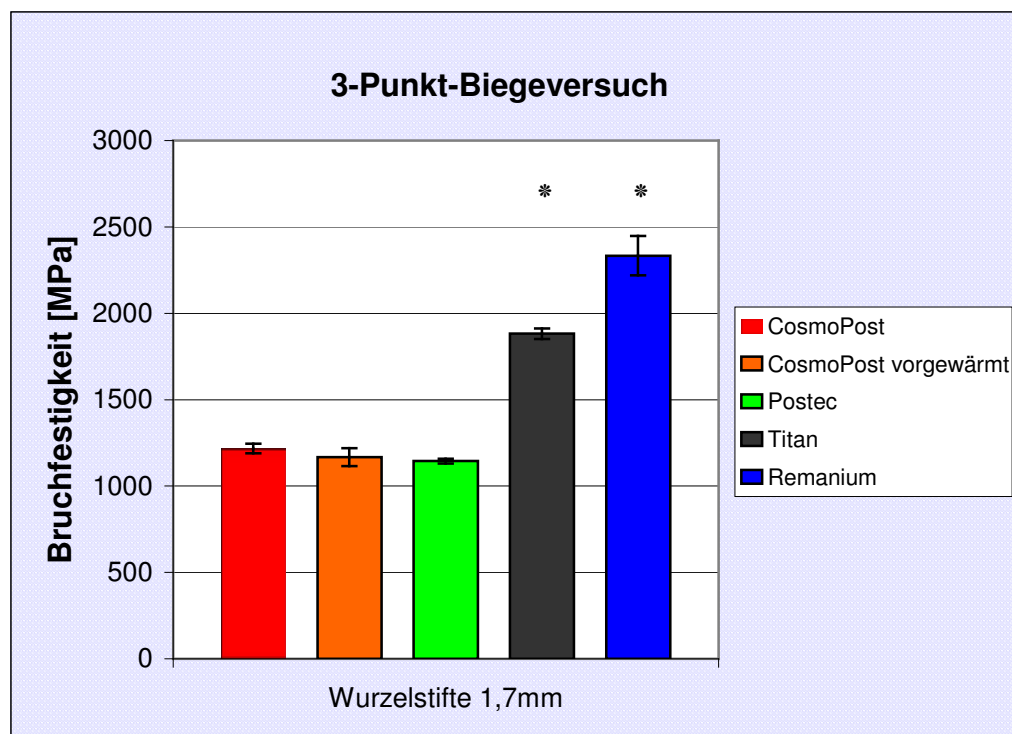


Abb. 18: Bruchfestigkeit der verschiedenen Stiftarten

* = signifikanter Unterschied ($p \leq 0,05$) zum CosmoPost

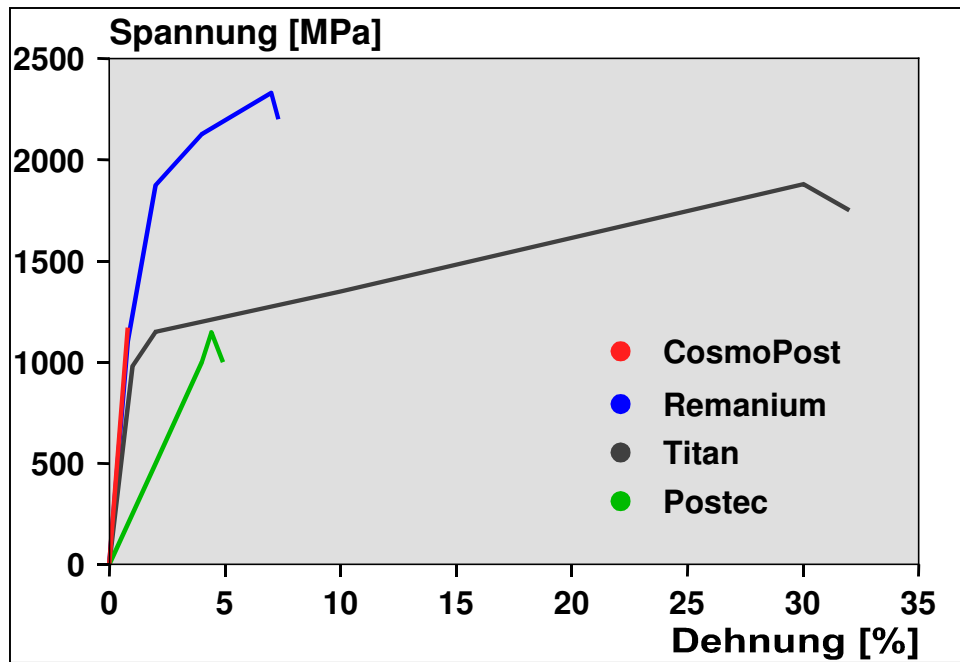


Abb. 19: Spannungs-Dehnungsdiagramm

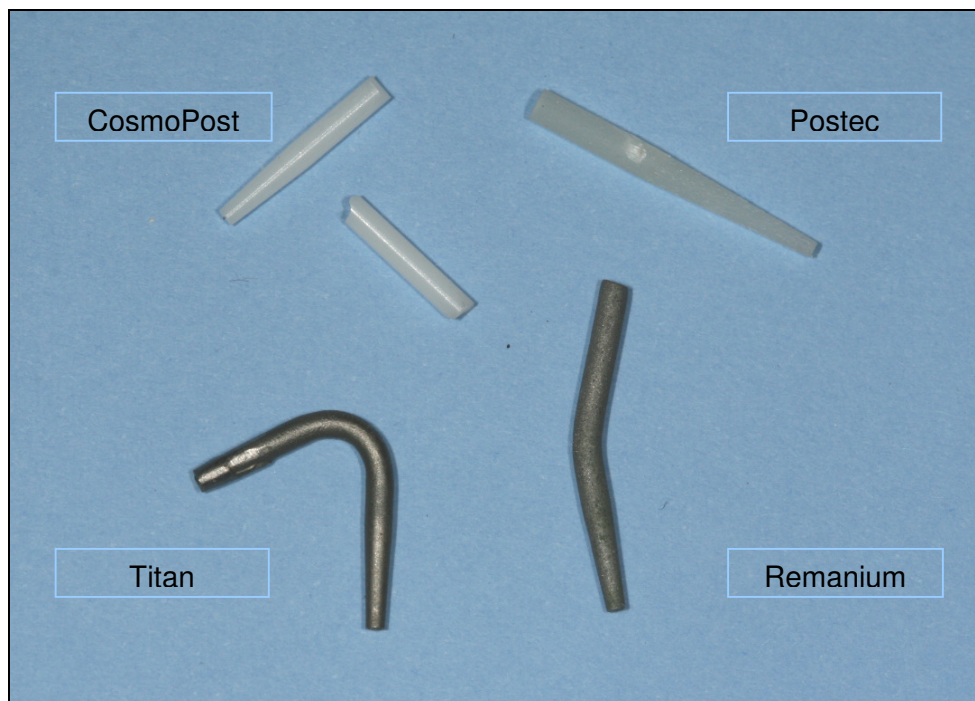


Abb. 20: Stiftarten nach 3-Punkt-Biegeversuch

5.5 Verbunduntersuchungen von CosmoPost-Stiften zum Aufbaumaterial

5.5.1 Druck-Scherfestigkeit von IPS Empress® Cosmo Rohling-Probekörpern an CosmoPost-Stiften

Für die Versuche mit Probekörpern galten die Druck-Scherfestigkeitswerte als ausschlaggebend, wenn sich die Probekörper vom Stift lösten oder brachen, was mit Hilfe des Testgerätes durch ein Stoppen des Versuches gekennzeichnet war. In dem folgenden Versuch war das Bruchverhalten bei allen Vorbehandlungsvarianten ähnlich, entweder brachen die Probekörper in Stücke, so dass ein Teil am Stift haften blieb, oder der Aufbau wurde komplett abgesichert (Abb. 22).

Die nach Herstellerangaben ohne Vorbehandlung zu verwendenden CosmoPost-Stifte erreichten als unbehandelte Gruppe in unserem Versuch mit angepressten Probekörpern aus IPS Empress® Cosmo-Keramik einen Wert von $21,6 \pm 6,5$ MPa. Die Ergebnisse der weiteren sechs Gruppen sind im Vergleich hierzu zu betrachten. Durch Konditionierung der Stifte mit der $\text{ZrO}_2/\text{TiO}_2$ -Lösung und mit dem Silicoater- bzw. dem Rocatec®-Verfahren konnte keine Steigerung der Verbundfestigkeit zwischen Stift und Aufbau erreicht werden. Auch für die nur mit Korund gestrahlten Stifte konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Durch zusätzliche Konditionierung der Stifte nach dem Korundstrahlen kam es jedoch zu erhöhten Werten bei beiden Gruppen. In der Kombination „korundgestrahlt mit $\text{ZrO}_2/\text{TiO}_2$ -Lösung“ konnte ein Wert von $27,6 \pm 5,6$ MPa erzielt werden. Eine ähnliche Erhöhung der Haftfestigkeit mit $29,2 \pm 3,4$ MPa wurde durch die Vorbehandlung „korundgestrahlt mit Silikatisierung mittels Silicoater-Verfahren“ ermittelt. Eine signifikante Erhöhung der Druck-Scherfestigkeit ist demnach durch eine Vorbehandlung der Zirkondioxid-Stifte mit Silikatisierung im Silicoater-Verfahren oder Konditionierung durch eine $\text{ZrO}_2/\text{TiO}_2$ -Lösung nach vorhergegangener Korundstrahlung im Vergleich zu unbehandelten Stiften nachweisbar. Die Scherfestigkeitswerte aller Varianten sind im folgenden Säulendiagramm dargestellt (Abb. 21).

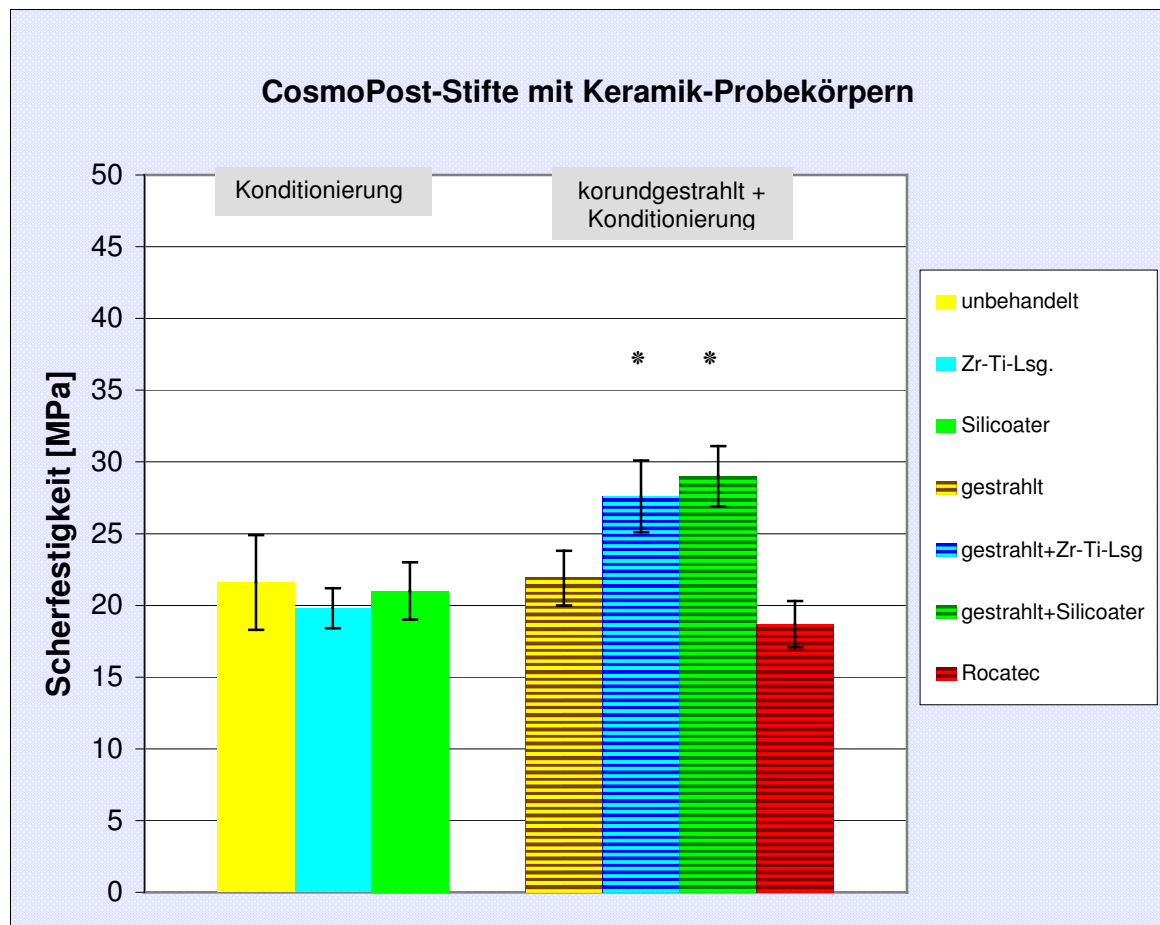


Abb. 21: Scherfestigkeit von IPS Empress® Cosmo Rohling-Probekörpern an unterschiedlich vorbehandelten CosmoPost-Stiften

* = signifikanter Unterschied ($p \leq 0,05$) zum unbehandelten CosmoPost

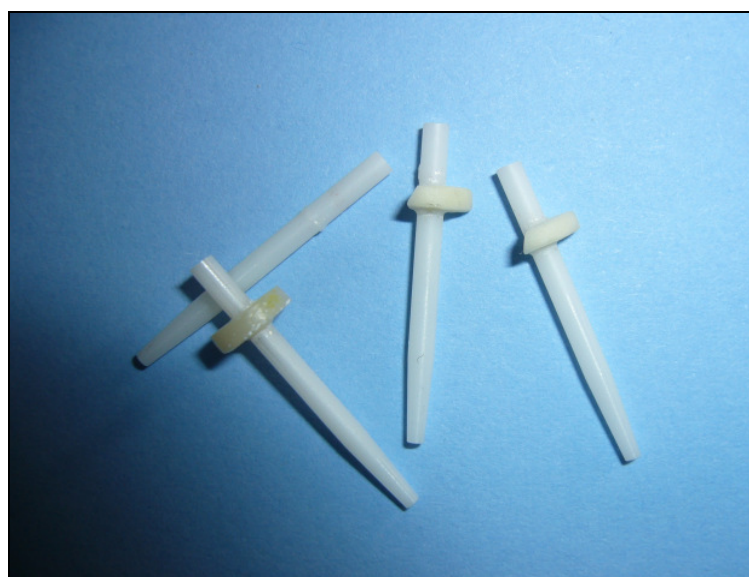


Abb. 22: Probekörper nach Belastung

5.5.2 Druck-Scherfestigkeit von Tetric® Ceram-Probekörpern an CosmoPost-Stiften

In dieser Versuchsreihe wurden Komposit-Probekörper getestet, die direkt an die unterschiedlich vorbehandelten CosmoPost-Stifte anmodelliert wurden. Die unbehandelt gelieferte Version der CosmoPost-Stifte wurde hier ebenfalls als Referenzgruppe genutzt. Die elf Versuchsgruppen kann man zur besseren Ergebnisauswertung in drei Hauptgruppen einteilen:

1. Hauptgruppe: unbehandelte Stifte und konditionierte Stifte mittels $\text{ZrO}_2/\text{TiO}_2$ -Lösung oder Silicoater-Verfahren
2. Hauptgruppe: korundgestrahlte Stifte in Verbindung mit den Konditionierungen $\text{ZrO}_2/\text{TiO}_2$ -Lösung oder Silicoater-Verfahren und die Vorbehandlung mit dem Rocatec®-System
3. Hauptgruppe: korundgestrahlte Stifte in Verbindung mit den oben genannten Konditionierungen und der zusätzlichen Beschichtung mit lichthärtendem Opaker

Die Ergebnisse hierzu werden in Abbildung 23 aufgezeigt.

Zu der ersten Hauptgruppe gehörten die unbehandelten Stifte, die keiner Konditionierung oder mechanischen Vorbehandlung durch Korundstrahlen unterzogen wurden. Hierbei wurde ein Druck-Scherfestigkeitswert von $6,0 \pm 0,6$ MPa ermittelt. Die weiteren Vorbehandlungen wie Konditionierung mit $\text{ZrO}_2/\text{TiO}_2$ -Lösung und Silikatisierung mittels Silicoater-Verfahren bewirkten eine signifikante Verbesserung des Verbundes im Vergleich zum unbehandelten Stift. Es wurden Druck-Scherfestigkeitswerte von $10,8 \pm 3,4$ MPa für „ $\text{ZrO}_2/\text{TiO}_2$ -Lösung“ und von $14,0 \pm 1,9$ MPa für „Silicoater“ erreicht.

In der zweiten Hauptgruppe finden sich die korundgestrahlten Stifte in Verbindung mit verschiedenen Konditionierungen. Die Probekörper an „nur“ korundgestrahlten Stifte zeigten in dieser Gruppe die niedrigsten Festigkeitswerte von $11,6 \pm 1,5$ MPa. Nach den zusätzlichen Konditionierungen mit $\text{ZrO}_2/\text{TiO}_2$ -Lösung und der Verwendung des Silicoater-Verfahrens konnten erneut signifikante Erhöhungen

des Haftverbundes nachgewiesen werden. Die Mittelwerte lagen hier für „ZrO₂/TiO₂-Lösung“ bei $20,8 \pm 6,0$ MPa und für „Silicoater“ bei $25,5 \pm 1,9$ MPa. Die Konditionierung der Stifte mittels Rocatec[®]-Verfahren, welches Korundstrahlen und Silikatisierung beinhaltet, bewirkte im Vergleich zu den „nur“ korundgestrahlten Stiften eine deutlich geringere Verbesserung des Verbundes zwischen Stift und Aufbau ($14,1 \pm 1,0$ MPa) als die vorher genannten Konditionierungsmethoden.

Die Gemeinsamkeit in der dritten Hauptgruppe bestand in dem zusätzlichen Auftragen eines lichthärtenden Opakers nach vorangegangenem Korundstrahlen und/oder Konditionieren der Stiftoberfläche. Das Auftragen von Opaker nach Korundstrahlen bewirkte allerdings mit einem Mittelwert von $13,4 \pm 4,8$ MPa keine signifikante Erhöhung der Druck-Scherfestigkeit im Vergleich zu den „nur“ korundgestrahlten Stiften der vorherigen Hauptgruppe. Signifikante Unterschiede dazu konnten jedoch bei den Vorbehandlungen „korundgestrahlt - ZrO₂/TiO₂-Lösung - Opaker“ und „korundgestrahlt - Silicoater - Opaker“ festgestellt werden. Die höchsten Werte wurden in dieser Kombination für ZrO₂/TiO₂-Lösung ($37,8 \pm 9,5$ MPa) ermittelt, dicht gefolgt von der „Silicoater-Vorbehandlung“ mit ähnlichem Mittelwert ($36,4 \pm 6,3$ MPa). Die Konditionierung mit dem Rocatec[®]-System und zusätzlichem Auftragen von Opaker ergab in dieser Gruppe ebenfalls eine signifikante Erhöhung des Haftverbundes zwischen Probekörper und Stift. Der Wert dafür lag mit $31,1 \pm 12,8$ MPa zwar unter den eben genannten Mittelwerten, zeigt aber im Vergleich zu den korundgestrahlten Stiften dieser Gruppe eine signifikante Verbesserung.

Bei der Gegenüberstellung der Ergebnisse wurde deutlich, dass die geringste Druck-Scherfestigkeit bei den unbehandelten CosmoPost-Stiften zu verzeichnen war. Durch alle Vorbehandlungsmaßnahmen war eine signifikante Steigerung der Druck-Scherfestigkeit im Vergleich dazu nachweisbar. Die Verwendung der Konditionierungen mittels ZrO₂/TiO₂-Lösung, Silicoater- und Rocatec[®]-Verfahren bedingte einen ähnlichen signifikanten Anstieg der Druck-Scherfestigkeitswerte. Eine weitere Verbesserung des Haftverbundes zwischen Stift und Probekörper wurde durch die Konditionierungen mittels ZrO₂/TiO₂-Lösung oder Silicoater nach

vorangegangenen Korundstrahlen erreicht. Durch die zusätzliche Beschichtung mit Opaker konnte eine erneute signifikante Steigerung für alle Konditionierungen festgestellt werden.

Die höchsten Druck-Scherfestigkeitswerte im Verbund zum Kompositaufbau wurden mit den CosmoPost-Stiften erreicht, die korundgestrahlt, mit ZrO_2/TiO_2 -Lösung und Opaker beschichtet wurden, dicht gefolgt von korundgestrahlten, zusätzlich mit dem Silicoater-Verfahren und Opaker vorbehandelten Stiften.

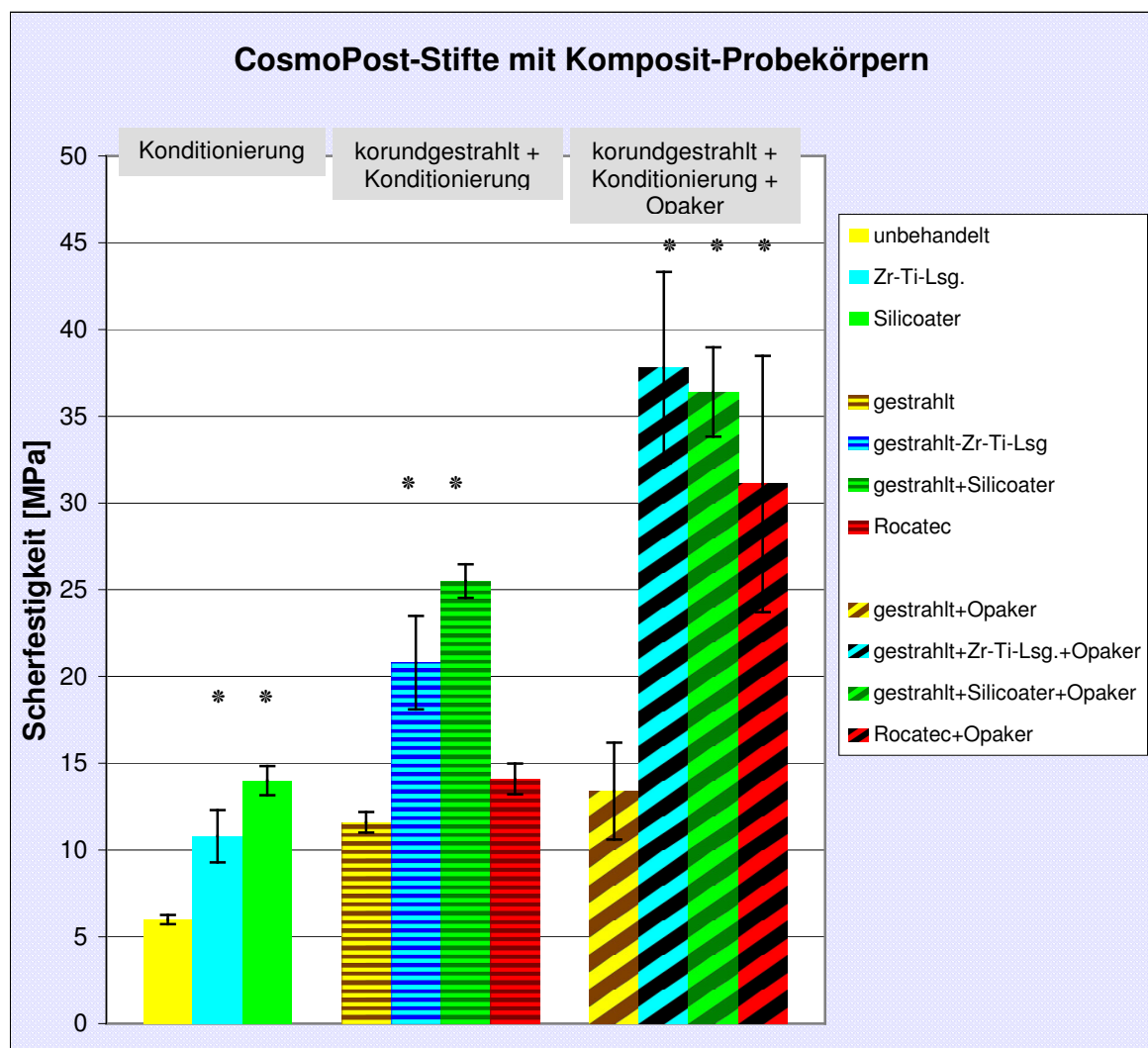


Abb. 23: Scherfestigkeit von Tetric[®] Ceram-Probekörpern an unterschiedlich vorbehandelten CosmoPost-Stiften

* = signifikanter Unterschied ($p \leq 0,05$) zum ersten CosmoPost der jeweiligen Gruppe

5.5.3 Vergleich CosmoPost-Stifte/IPS Empress® Cosmo Rohling-Probekörper und CosmoPost-Stifte/Tetric® Ceram-Probekörper

Im Vergleich zwischen dem Verbund vorbehandelter CosmoPost-Stifte mit angespresstem Aufbau und vorbehandelter CosmoPost-Stifte mit Kompositaufbau konnten folgende Unterschiede festgestellt werden: Zunächst wurden für gänzlich unbehandelte CosmoPost-Stifte, wie geliefert und nach Herstellerangaben zur Verwendung empfohlen, deutlich bessere Verbundeigenschaften für den Aufbau aus angespresster Keramik erreicht. Entsprechende Werte konnten für den Verbund zum Komposit erst mit Vorbehandlungen wie „korundgestrahlt - $\text{ZrO}_2/\text{TiO}_2$ -Lösung“, „korundgestrahlt - Silicoater“ und „Rocatec - Opaker“ erzielt werden. Die Beschichtung mit Opaker wurde bei den Probekörpern aus Anpresskeramik wegen der Temperaturbehandlung während des Pressvorgangs als nicht sinnvoll erachtet und somit nicht durchgeführt. Die Vorbehandlungskombinationen „korundgestrahlt - $\text{ZrO}_2/\text{TiO}_2$ -Lösung“ und „korundgestrahlt - Silicoater“ ergaben auch bei den Stiften mit angespresster Keramik eine deutliche Verbesserung. Die ermittelten Druck-Scherfestigkeiten erreichten für diese Versuchsreihe die höchsten Werte, wurden aber durch die besten Werte der Komposit-Versuchsreihe übertroffen. Der beste Verbund bei einem Aufbau aus Komposit wurde erzielt, wenn nach dem Korundstrahlen und der Konditionierung mittels Silicoater oder Beschichtung mit $\text{ZrO}_2/\text{TiO}_2$ -Lösung zusätzlich Opaker aufgetragen wurde. Es wurden Ergebnisse mit Werten von $36,4 \pm 6,3$ MPa für Silikatisierung mittels Silicoater und $37,8 \pm 9,5$ MPa für Beschichtung mit $\text{ZrO}_2/\text{TiO}_2$ -Lösung erreicht. In Abbildung 24 sind die Werte gegenübergestellt.

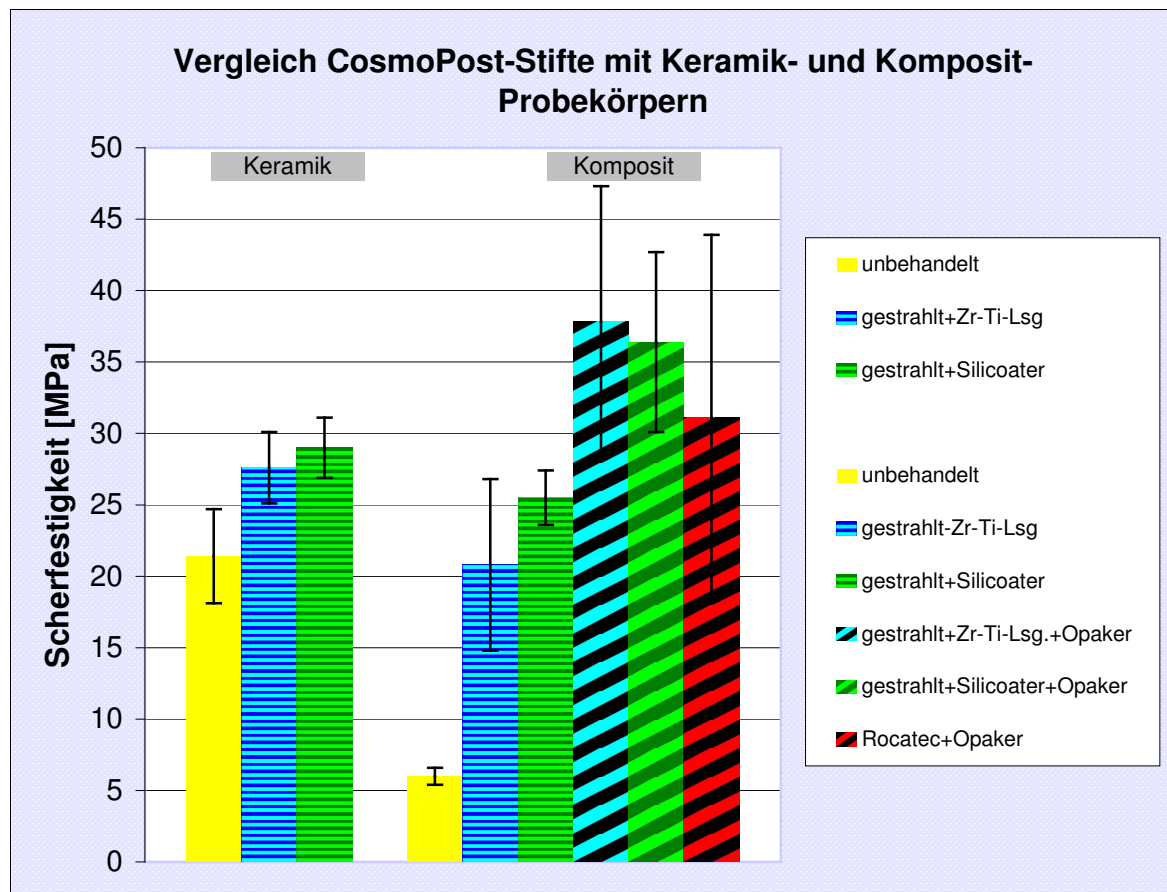


Abb. 24: Scherfestigkeit von IPS Empress® Cosmo Rohling- und Tetric® Ceram-Probekörpern an CosmoPost-Stiften im Vergleich

5.5.4 Druck-Scherfestigkeit von IPS Empress® Cosmo Rohling-Probekörpern an CosmoPost-Stiften nach Temperaturlastwechsel

Nach 25.000 Temperaturlastwechseln zwischen 5° und 60°C ergaben sich für die CosmoPost-Stifte mit angespresstem Aufbau unterschiedliche Mittelwerte. Es wurden zwei Versuchsreihen ausgewählt. Die erste Variante waren, wie auch schon in den vorherigen Versuchen, die Stifte ohne Vorbehandlung. Die Wurzelstifte für die andere Gruppe wurden korundgestrahlt und mit dem Silicoater-Verfahren konditioniert. Die unbehandelten Stifte zeigten eine signifikant geringere Druck-Scherfestigkeit nach der Thermozyklisierung mit $8,8 \pm 1,2$ MPa. Dies bedeutet eine 60 %ige Verschlechterung des Ursprungswertes. Bei der zweiten

Gruppe war die Festigkeitsminderung mit einem prozentualen Abfall von rund 10% und einem Mittelwert von $26,4 \pm 10,5$ MPa weitaus geringer. In Abbildung 25 sind die Werte vor und nach Wechsellast dargestellt.

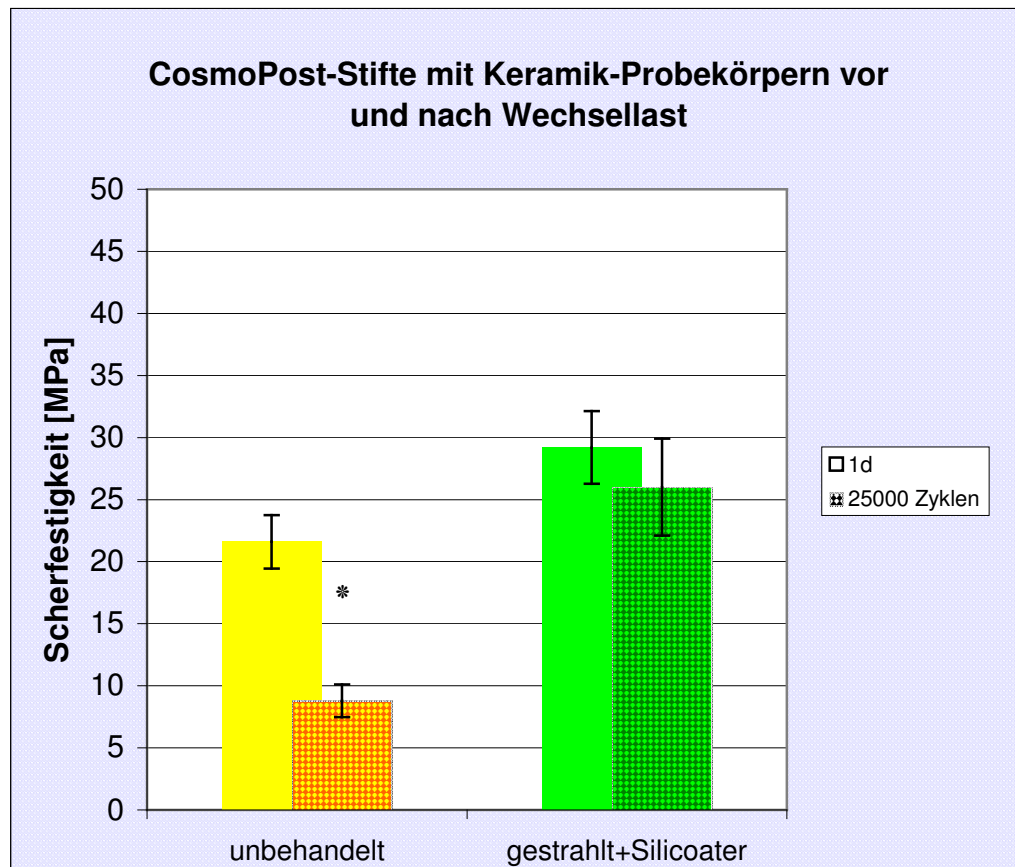


Abb. 25: Scherfestigkeit von IPS Empress® CosmoRohling-Probekörpern an CosmoPost-Stiften vor und nach Wechsellast

* = signifikanter Unterschied ($p \leq 0,05$) zum CosmoPost vor Wechsellast

5.5.5 Druck-Scherfestigkeit von Tetric® Ceram-Probekörpern an CosmoPost-Stiften nach Temperaturlastwechsel

Bei der Auswahl der Vorbehandlungsmethoden für diesen Teilversuch wurden einige uneffektive Vorbehandlungsvarianten aus dem vorhergegangenen Versuch mit Komposit-Probekörpern nicht mit einbezogen. So blieben insgesamt sechs Gruppen übrig, die einem Temperaturlastwechsel von 25.000 Zyklen unterzogen wurden. Es wurde bei allen Versuchsgruppen eine Minderung der Druck-Scherfestigkeit festgestellt. Der Wert für die unbehandelten Stifte lag nunmehr bei $3,1 \pm 0,8$ MPa und stellte auch hier die niedrigste Haftfestigkeit dar. Auch nach Temperaturwechsellast blieben die Steigerungen der Druck-Scherfestigkeit durch die verschiedenen Konditionierungen der Stiftoberflächen erhalten, jedoch mit unterschiedlich niedrigeren Festigkeitswerten. Die höchste Druck-Scherfestigkeit konnte wiederum nach Korundstrahlen und Vorbehandlung der Stifte mit Silicoater und Opaker erzielt werden, die jedoch mit einem Mittelwert von $25,4 \pm 4,5$ MPa um 30 % geringer einzustufen ist als vor der Temperaturwechsellast. Die Scherfestigkeitswerte für die verschiedenen Vorbehandlungen im Vergleich vor und nach Wechsellast sind im folgenden Diagramm (Abb. 26) dargestellt. Deutlich wurde, dass die Abnahme der Scherfestigkeit für korundgestrahlte und mit Silicoater vorbehandelte Stifte mit 26,7 % am geringsten war. Für die Vorbehandlungen „korundgestrahlt - $\text{ZrO}_2/\text{TiO}_2$ -Lösung“ und „korundgestrahlt - $\text{ZrO}_2/\text{TiO}_2$ -Lösung - Opaker“ zeigte sich durch Festigkeitsminderungen von 68,3 % und 66,4 %, dass der Verbund hier am anfälligsten auf Temperaturlastwechsel reagierte. Die prozentualen Abweichungen lagen für die anderen Vorbehandlungsvarianten zwischen 46 und 48 % (unbehandelt – 48 %, $\text{ZrO}_2/\text{TiO}_2$ -Lösung – 46,3 %).

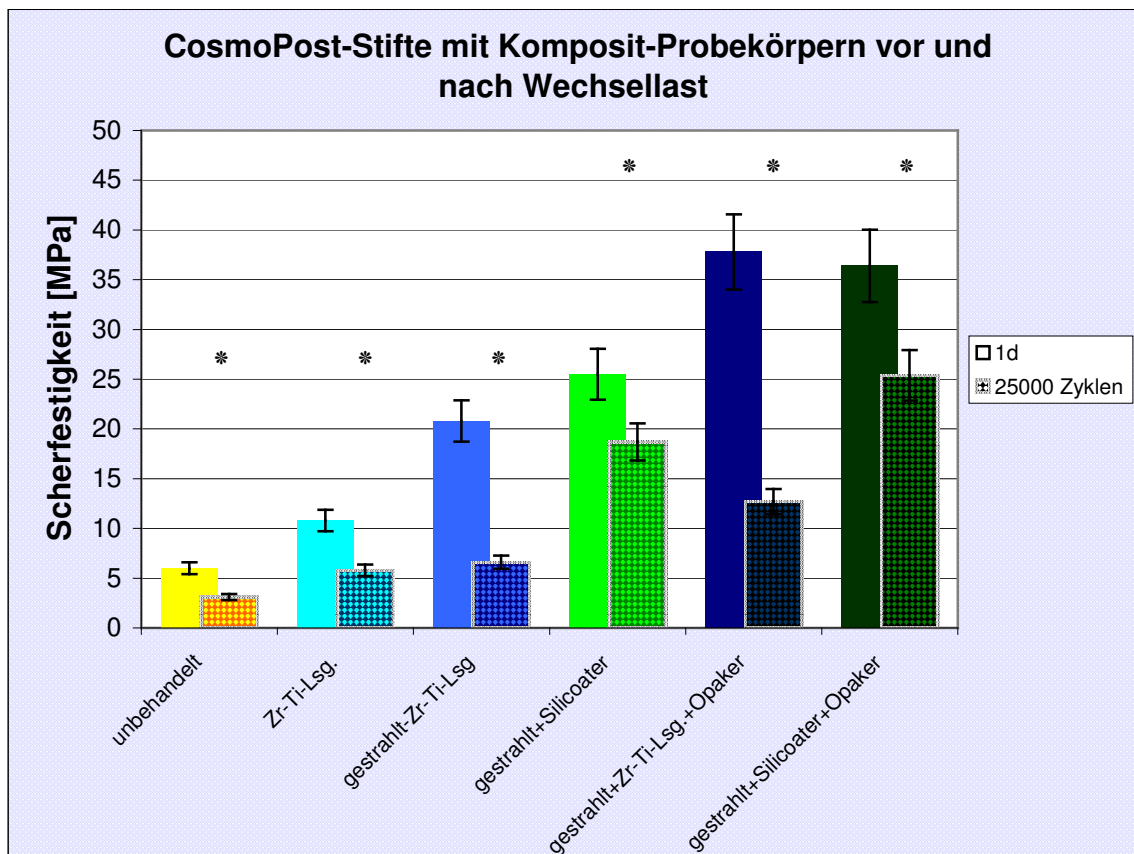


Abb. 26: Scherfestigkeit von Tetric[®] Ceram-Probekörpern an CosmoPost-Stiften vor und nach Wechsellast

* = signifikanter Unterschied ($p \leq 0,05$) zum CosmoPost vor Wechsellast

5.6 Druck-Scherfestigkeit von Tetric[®] Ceram-Probekörpern an FRC Postec[®]-Stiften

Analog zu den Probekörpern aus angespresster Keramik und Komposit an CosmoPost-Stiften, wurden Komposit-Probekörper in gleicher Dimensionierung an glasfaserverstärkte FRC Postec[®]-Stifte anmodelliert und auf Druck-Scherfestigkeit getestet. Hierbei ergab sich für die unbehandelten Stifte ein Festigkeitsmittelwert von $12,3 \pm 1,7$ MPa, der somit im Vergleich zu den unbehandelten CosmoPost-Stiften mit Kompositaufbau signifikant höher ist. Durch Vorbehandlungen der FRC Postec[®]-Stifte konnte die Haftfestigkeit gesteigert werden. Die Werte lagen bei $22,2 \pm 2,5$ MPa bei vorangegangenen Korundstrahlen plus Beschichtung mit

Haftsilan. Eine weitere Erhöhung wurde durch zusätzliches Auftragen eines Opakers nach Beschichtung mit Haftsilan erreicht. Diese Variante erzielte eine Druck-Scherfestigkeit von $29,4 \pm 2,9$ MPa. Eine Übersicht hierzu gibt das folgende Diagramm (Abb. 27).

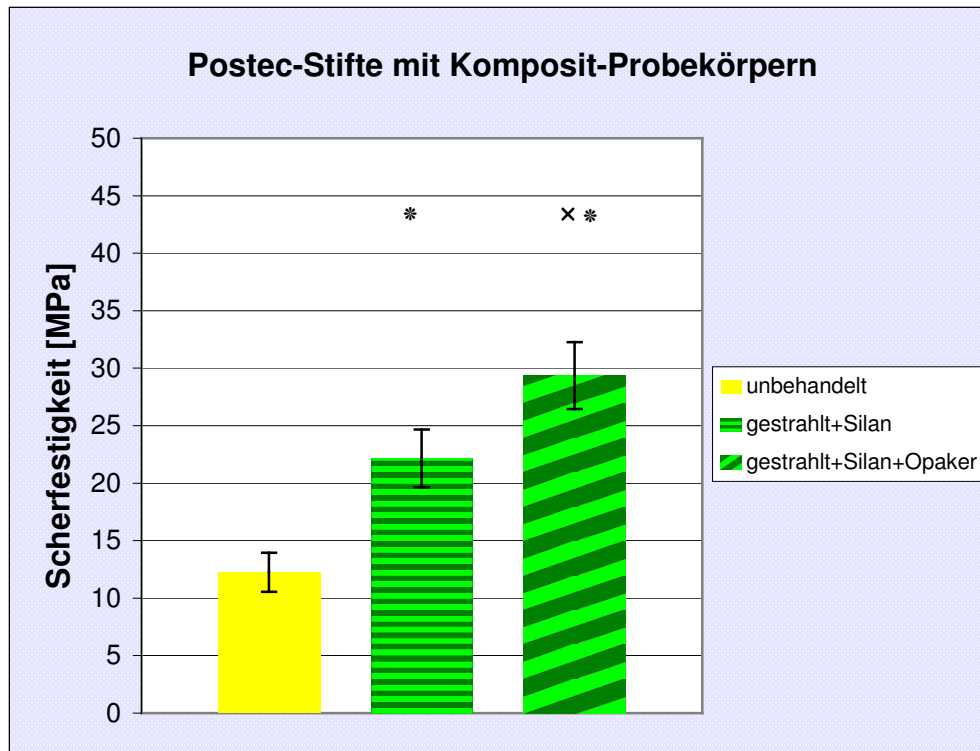


Abb. 27: Scherfestigkeit von Tetric® Ceram-Probekörpern an FRC Postec®-Stiften

* = signifikanter Unterschied ($p \leq 0,05$) zum unbehandelten Postec

x = signifikanter Unterschied ($p \leq 0,05$) zum Postec „gestrahlt + Silan“

5.7 Druck-Scherfestigkeit von Variolink® II-Probekörpern an CosmoPost- und FRC Postec®-Stiften

5.7.1 Variolink® II-Probekörper an CosmoPost-Stiften

Die Versuchsreihe mit dem dickflüssigeren Variolink® II-Komposit, das wie die vorangegangenen Probekörper dimensioniert und an die Stifte adaptiert wurde, bestand aus drei Vorbehandlungsmöglichkeiten. Die Wahl fiel dabei auf die

Gruppen mit den besten Druck-Scherfestigkeitswerten des Versuches CosmoPost-Stift mit Komposit-Probekörpern. Im unteren Bereich mit $17,4 \pm 6,9$ MPa befanden sich die mit dem Rocatec[®]-Verfahren vorbereiteten und mit Opaker beschichteten Stifte. Höhere Druckfestigkeiten wurden mit den Vorbehandlungen durch Korundstrahlen sowie in einem Fall zusätzlicher ZrO₂/TiO₂-Lösung-Konditionierung und Opakerbeschichtung und im anderen Fall zusätzlicher Silikatisierung mittels Silicoater und Opakerbeschichtung erreicht. Beide Mittelwerte unterschieden sich nicht signifikant. Im Fall ZrO₂/TiO₂-Lösung wurden $29,4 \pm 5,9$ MPa und bei der Silicoaterkonditionierung $33,5 \pm 4,6$ MPa erzielt. Als Übersicht dient das folgende Diagramm (Abb. 28).

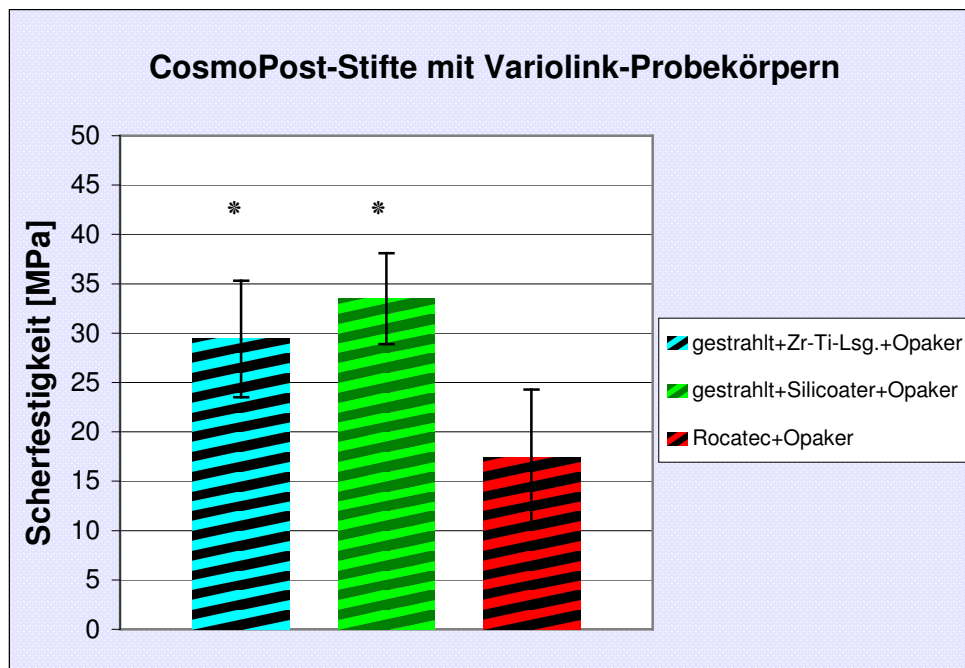


Abb. 28: Scherfestigkeit von Variolink[®] II-Probekörpern an CosmoPost-Stiften

* = signifikanter Unterschied ($p \leq 0,05$) zum CosmoPost „Rocatec“

5.7.2 Variolink® II-Probekörper an FRC Postec®-Stiften

Die FRC Postec®-Stifte wurden in einer Versuchsgruppe in unbehandeltem Zustand verwendet. Die Druck-Scherfestigkeit betrug $24,3 \pm 1,6$ MPa. Wurde wie nach Arbeitsanleitung zur Verwendung des Variolink® II/Syntac Classic®-Systems in Verbindung mit glasfaserverstärkten Stiften Monobond S auf die Stiftoberfläche aufgetragen, resultierte ein ähnlicher Wert für die Haftfestigkeit ($25,5 \pm 5,6$ MPa) wie für die unbehandelten Stifte. Eine signifikante Erhöhung der Druck-Scherfestigkeit mit einem Mittelwert von $40,5 \pm 6,5$ MPa konnte nach Vorbehandlung durch Silkatisierung mittels Silicoater-Verfahren und zusätzlicher Beschichtung mit Opaker erreicht werden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 29 dargestellt.

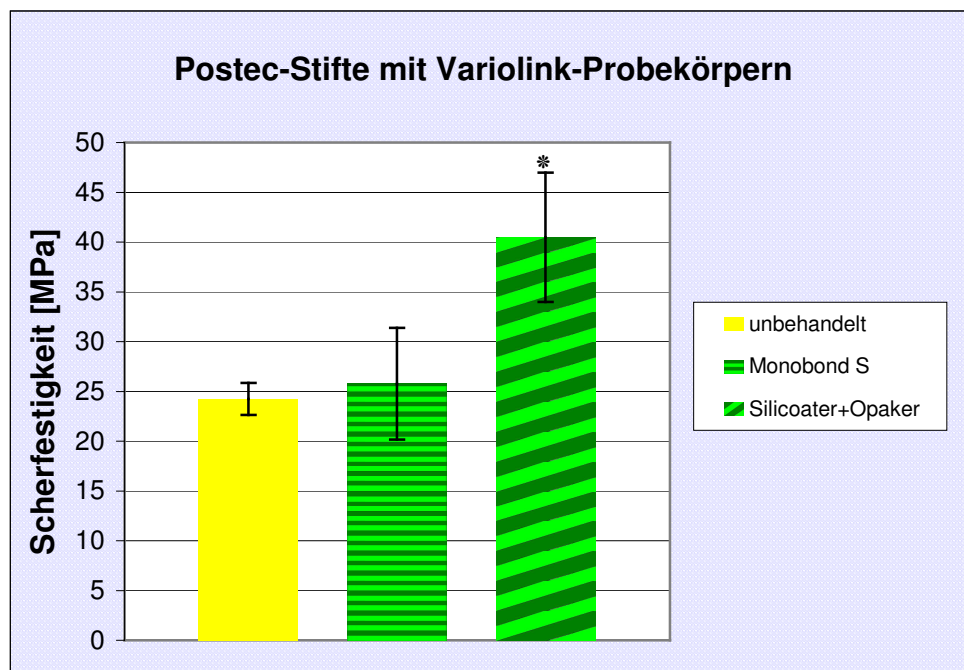


Abb. 29: Scherfestigkeit von Variolink® II-Probekörpern an FRC Postec®-Stiften;

* = signifikanter Unterschied ($p \leq 0,05$) zum unbehandelten Postec und Postec „Monobond S“

6 Diskussion

Die Verwendung zahnfarbener Wurzelstifte steht immer mehr im Vordergrund, gerade wenn es sich um die Versorgung endodontisch behandelter Zähne im sichtbaren Bereich handelt. Die ästhetischen Vorteile in Bezug auf die Transluzenz im Kronenbereich und die Erhaltung der „roten Ästhetik“ mit einer unverändert natürlichen Färbung der Gingiva im Wurzelbereich sind unumstritten. Dentalkeramiken zeichnen sich nicht nur durch eine hohe Ästhetik, sondern auch durch ihre Biokompatibilität und ihre Korrosionsfestigkeit aus. Deren Sprödigkeit und geringe Festigkeit limitierte jedoch den klinischen Einsatz für Wurzelstifte und Stumpfaufbauten. Die in der Zahnmedizin geforderte Bruchfestigkeit ist erst durch die Verwendung von mit Yttrium-teilstabilisierter Zirkondioxid-Keramik erreicht worden (Pleims 1994). Bezeichnend für diese Keramik ist der hohe Weibullmodul, eine für Keramiken extrem hohe Biegefestigkeit und Druckeigenspannung und die im Vergleich zu anderen Dentalkeramiken bessere Risszähigkeit (Fischer et al. 1998). Bei Rissentstehung findet eine Phasenumwandlung des Zirkondioxids statt (von der tetragonalen in die monokline Phase), die eine 4%ige Volumenzunahme der Kristalle bedingt und somit durch die lokale Druckspannung eine weitere Rissausbreitung verhindert.

Für die Restauration eines Zahnes mit komplettem Stift-Stumpfaufbau und anschließender Überkronung bietet sich die Nutzung eines in sich abgestimmten Systems an. Dafür existieren eine Reihe von Verfahren zur Herstellung vollkeramischer Stift-Stumpfaufbauten, beispielsweise mit Hilfe der In-Ceram-Technologie, der Kopierschleiftechnik oder der Ergänzung eines konfektionierten Zirkondioxid-Wurzelstiftes mit kopiergeschliffenem, adhäsiv befestigten oder angespresstem Aufbau (Friedel und Kern 2006, Koutayas und Kern 1999). Die letztgenannte Methode, das Anpressen eines keramischen Aufbaus an einen Zirkondioxid-Stift, bietet akzeptable werkstoffkundliche Eigenschaften. In diesem Fall wird die von der Firma Ivoclar Vivadent entwickelte IPS Empress Cosmo-Keramik (Cosmo Rohling) an den konfektionierten Zirkondioxid-Stift CosmoPost im Heißpressverfahren angespresst. Der ähnliche Wärmeausdehnungskoeffizient

beider Keramiken von ca. $10 \times 10^{-6}/K$ sichert einen guten Haftverbund und eine hohe Passfähigkeit. *In vitro* Untersuchungen zeigten für dieses System vielversprechende Ergebnisse. Es wurde aber eine Beschränkung der Verwendung der Stifte auf die Frontzahnregion des Oberkiefers empfohlen und auf weitere notwendige Untersuchungen hingewiesen. Die wenigen klinischen Studien belegen diese Anforderung. Auch Edelhoff et al. schlussfolgerten 2000 nach ersten klinischen Erfahrungen, dass Langzeitstudien abzuwarten seien, bevor eine abschließende Beurteilung des Systems möglich sei. Die Frakturgefahr der Wurzelstifte, gerade im Bereich des Kanaleingangs, stellt ein nicht zu unterschätzendes Problem für die Haltbarkeit des Kronen-Wurzelsystems dar. Nicht selten ist eine Entfernung des extrem harten Wurzelstiftes sehr schlecht möglich und ist mit großem Substanzverlust des Wurzeldentins verbunden. Die dadurch entstandene zusätzliche Schwächung der Wurzel bedingt eine erhöhte Frakturgefahr, so dass eine Extraktion des Zahnes häufig unumgänglich ist. Zwar wird ein Reparatur-Set (z.B. Repair-Wurzelstiftsystem der Firma Komet) für dieses Vorgehen angeboten, welches aber bei Anwendung die entstandene Problematik nicht in jedem Fall verbessert.

Um die Zuverlässigkeit des CosmoPost/IPS Empress® Cosmo Rohling-Systems genauer zu überprüfen und Lösungsansätze für die Verbesserung der Schwachstellen zu finden, wurde eine *in vitro* Untersuchung möglichst nach klinischen Gesichtspunkten durchgeführt. Es wurden menschliche, obere erste Schneidezähne verwendet, die nach Extraktion in 0,1 %-iger Thymollösung bis zur weiteren Verarbeitung gelagert wurden. Dieses Vorgehen hat sich neben der Einlagerung in physiologischer Kochsalzlösung oder destilliertem Wasser in vielen Studien bewährt (Attin et al. 1994, Butz et al. 2001, Heydecke und Peters 2002). Die Thymollösung soll die Zähne vor Dehydratation schützen und verhindern, dass sie spröde und zerbrechlich werden sowie die mikrobiologische Aktivität herabsetzen (Helfer et al. 1972). Die Zähne wurden nach jedem Zwischenschritt wieder in der Lösung gelagert. Eine Verwendung von Rinderzähnen, die sicherlich in weit größerer Anzahl zur Verfügung gestanden hätten und auch schon häufig für Bruchfestigkeitsversuche genutzt wurden, kam aufgrund der größeren Wurzelkanalanatomie nicht in Frage. Die limitierte Anzahl frischer, möglichst

unbehandelter Oberkiefer-Frontzähne boten eine Aufbereitung der Kanäle in gleichen ISO-Größen und es konnte eine einheitliche Vorbereitung für die Aufnahme eines Wurzelstiftes des Durchmessers 1,7 mm gewährleistet werden. Von der vorangegangenen Wurzelfüllung mittels Guttapercha und Sealer unter Anwendung der lateralen Kondensationstechnik wurden ca. 3 mm im Apexbereich belassen. Die Aufbereitungslänge für den Stift betrug einheitlich 10 mm. Andere Studien beschreiben eine Restbelassung der Wurzelfüllung von 4 mm und Stiftlängen von beispielsweise 9 mm (Friedel und Kern 2006). Gleiche Abzugskräfte bei unterschiedlichen Stiftlängen belegen Versuche von Nergiz et al. 1993 nach Vorbehandlung der Wurzelkanalinnenflächen und Stiftoberfläche. Fernandes et al. arbeiteten 2003 heraus, dass für zementierte Stifte die gewählte Länge und das Design einen entscheidenden Einfluss auf die Retention haben. Im Gegensatz dazu scheint eine kürzere Insertionstiefe des Stiftes von ungefähr der halben Wurzellänge (etwa 6 mm) bei adhäsiver Befestigung ausreichend zu sein (Nissan et al. 2001, Weiger 2000). Im klinischen Einsatz sollte in jedem Fall im Hinblick auf die apikale Versiegelung auf die Erhaltung eines Wurzelkanalfüllungsanteils von ca. 4 mm geachtet werden (Magura et al. 1991). Wichtig war für die Versuchsanordnung der vorliegenden Arbeit eine einheitliche Stiftlänge vorzuweisen.

Für die Testung der Bruchfestigkeit extrahierter Zähne ist die Belastung in einem Winkel von 135° zur Längsachse des Zahnes eine gängige Methode (Babenhauerheide und Freesmeyer 2004, Friedel und Kern 2006, Libman und Nicholls 1995, Rosentritt et al. 2004). Die Zähne werden dafür in eine Spezialvorrichtung eingebettet und im inzisalen Drittel mit Hilfe einer Universalprüfmaschine (in unseren Versuchen Typ 1435 – Zwick) bis zum Bruch belastet. Die Einbettung erfolgt in einen PMMA-Kunststoff, wie in unserem Fall das Autopolymerisat Paladur® (Kulzer), bis 2 mm unter der Schmelz-Zement-Grenze, gemäß dem durchschnittlichen Abstand zwischen Alveolarknochen und Schmelz-Zement-Grenze im natürlichen Gebiss. Um die elastische Verankerung der Zähne zu imitieren, wird oft eine dünne Manschette aus dünnfließendem Silikon um die Wurzeln gelegt und dann erst die Einbettung in den Kunststoff vorgenommen (Janssen und Hülsmann 2003). In den Versuchen dieser Arbeit wurde dies nicht

angewendet, da die eigentliche Krafteinwirkung auf den Zahn erst beginnt, wenn der Weg des elastischen Bereiches überschritten ist und es nicht zu einer Veränderung des Endwertes kommt.

Die vorliegenden Ergebnisse des ersten Versuches zur Bruchfestigkeit zeigen, dass die adhäsive Befestigung der Stift-Stumpfaufbauten in der Wurzel keinen signifikanten Einfluss auf die Bruchfestigkeit der untersuchten Stift-Stumpfaufbauten hatte. Im Bruchverhalten wurde kein Unterschied zur konventionellen Befestigung festgestellt. Wie auch Ring-Durchstoß-Versuche von Göbel et al. 1998 zeigten, führte die adhäsive Befestigung von Zirkondioxidkeramik bei der verwendeten Versuchsanordnung nicht zu einem stabileren Verbund, verglichen mit der konventionellen Zementierung. Der Vorteil der häufig festgestellten elastischen Pufferfunktion bei adhäsivem Vorgehen und der damit verbundenen Stabilisierung des Wurzelsystems konnte hier nicht erkannt werden. Es kam in keinem Fall zu Wurzelfrakturen, teilweise nur zu kleineren Absplitterungen des Dentins im Bereich der Aufbauten. Bezeichnend bei allen Zähnen war der Bruch des Wurzelstiftes und somit die Ablösung des Stumpfaufbaus von Stift und Dentin.

In der zweiten Versuchsreihe wurden die Stift-Stumpfaufbauten zusätzlich mit Empress® 2-Kronen versorgt. Für die Zementierung der Stift-Stumpfaufbauten wurde die adhäsive Befestigung gewählt. Obwohl, wie oben genannt, damit zwar keine signifikante Verbesserung der Bruchfestigkeit erreicht werden konnte, waren die Werte doch etwas höher als die bei konventioneller Befestigung. Zudem wurde in der Literatur bei adhäsiver Vorgehensweise häufig eine Stabilisierung der frakturgefährdeten Restzahnschubstanz (Mendoza et al. 1997) sowie eine Erhöhung der Retentionswerte bei Zugbelastung (Nathanson et al. 1993) nachgewiesen.

Die Ergebnisse zeigten im Fall der Empress® 2-Kronen einen signifikanten Unterschied zwischen konventioneller und adhäsiver Zementierung der Vollkeramikronen auf Zirkondioxid-Stift-Stumpfaufbauten. Demzufolge trug die adhäsive Befestigung entscheidend zur Stabilisierung des Systems bei. Auch Kern et al. zeigten 1995 bei adhäsiver Befestigung eine Verbesserung der Stabilität der restaurierten Zähne, insbesondere wenn ein vollkeramisches System verwendet

wurde. Sie stellten fest, dass die adhäsive Befestigung von InCeram®-Kronen auf InCeram®-Stift-Stumpfaufbauten die Bruchfestigkeit der so versorgten Zähne verdoppelt. In der Gegenüberstellung von konventionell und adhäsiv befestigten Empress 1-Kronen über einen Zeitraum von vier Jahren *in situ* konnte im Hinblick auf die Überlebenswahrscheinlichkeit jedoch kein Unterschied festgestellt werden (Edelhoff et al. 2000). Es wurden lediglich vermehrt Verfärbungen des marginalen Kronenrandes und Reizungen der umgebenden Gingiva bei den adhäsiv zementierten Kronen beobachtet. Dies wurde von den Autoren mit den ungünstigen Befestigungsbedingungen für die Adhäsivtechnik bei Kronen, d.h. mit der Schwierigkeit einer absoluten Trockenlegung begründet. Aufgrund der Problematik der Kofferdam-Anwendung, gerade bei tief zerstörten Zähnen, bleibt die konventionelle Zementierung als Befestigungsalternative für Vollkeramik-kronen weiterhin bestehen (Nothdurft et al. 2003). Die Einschränkung der Transluzenz durch den opaken Zement wird hierbei außer Acht gelassen.

Was die Festigkeit des Stift-Stumpfaufbau-Systems der vorliegenden Arbeit betrifft, zeigt sich, dass die untersuchten Zirkondioxidwurzelstifte mit angespresstem Aufbau eine wesentlich höhere Bruchfestigkeit als Stift-Stumpfaufbauten aus InCeram® aufweisen (Kern et al. 1995). In einer neueren Untersuchung werden vorfabrizierte Zirkondioxid-Stifte in Kombination mit einem adhäsiv zementierten gefrästen Aufbau aus InCeram®-Alumina als herausragend beschrieben (Friedel und Kern 2006). In der gleichen Studie wird diese zweiteilige, semikonfektionierte Methode als vorteilhafteste Anwendung für vollkeramische Stift-Stumpfaufbauten vorgeschlagen. Die dort ermittelten Bruchfestigkeitswerte von 404 N für Aufbauten mit Kronen und anschließender Kausimulation entsprechen denen unserer Ergebnisse mit adhäsiv befestigten Kronen bei ähnlichem Versuchsaufbau, allerdings ohne Dauerbelastung. Eine andere Variante der Nutzung von CosmoPost-Stiften untersuchten Jeong et al. 2002, indem sie IPS Empress®-Aufbauten getrennt herstellten und adhäsiv am CosmoPost befestigten. Im Vergleich zu CosmoPost-Stiften mit angespresstem IPS Empress® Cosmo-Aufbau und gefrästen Stift-Stumpfaufbauten aus InCeram®-Zirkonia ergab sich eine etwas höhere Druckfestigkeit, so dass die Autoren diese Möglichkeit als Alternative für die Anpressmethode in Erwägung ziehen. In der Literatur findet man zudem einige Studien zur Bruchfestigkeit des CosmoPost mit

angepresstem Aufbau nach statischer, dynamischer und thermozyklischer Dauerbelastung. So konnte nach einer Belastung von 1,2 Millionen Lastwechseln mit je 30 N eine 100%ige Überlebensrate der zusätzlich mit Kronen versorgten Aufbauten nachgewiesen werden (Heydecke et al. 2002). Im Vergleich dazu standen Titan- und CosmoPost-Stifte mit Komposit-Aufbau und gegossene metallische Stift-Stumpfaufbauten, die sich in den Festigkeitswerten nicht signifikant unterschieden. Diese Ergebnisse konnten von Butz et al. 2001 insofern bestätigt werden, dass sie die Verwendung von angepressten Aufbauten an Zirkondioxid-Stifte befürworten, aber von einer Kombination der Stifte mit einem Kompositaufbau aufgrund von signifikant niedrigeren Bruchfestigkeitswerten abraten. Eine andere Untersuchung lieferte für metallische und verschiedene keramische Stift-Stumpfaufbau-Kombinationen zwar höhere Druckfestigkeitswerte als für die in dieser Arbeit untersuchte Variante, aber schränkte den Einsatz des CosmoPost/IPS Empress® Cosmo Rohling-Systems unter klinischen Bedingungen nicht ein (Strub et al. 2001). In Bezug auf ihre Bruchlastwerte unterscheiden sich keramische Stiftaufbauten statistisch nicht von metallischen Stift-Stumpfaufbauten (Babenhäuserheide und Freesmeyer 2004), jedoch bezüglich ihres Bruchverhaltens. Die Bruchbelastung von Zähnen mit metallischen Stift-Stumpfaufbauten bedingt eine sehr hohe Frakturnrate der Wurzeln, obwohl laut klinischen Studien die Überlebensraten als sehr gut einzustufen sind (Weine et al. 1991). Wenn aber Brüche entstehen, ist eine Extraktion des Zahnes meist nicht zu vermeiden (Sidoli et al. 1997). Bei keramischen Stift-Stumpfaufbauten kommt es, wie auch im Ergebnisteil dieser Arbeit beschrieben, zu einer geringen Gefahr von Wurzelfrakturen. Die Wurzel kann zwar bei der Verwendung von Zirkondioxid-Stiften geschützt werden, die Überlebensrate der so versorgten Zähne ist jedoch im Hinblick auf die hohe Frakturnrate der Stifte eingeschränkt. Cormier et al. 2001 beschreiben neben ähnlichen Erfahrungen mit CosmoPost-Stiften Absplitterungen der Stift-Keramik, wobei einzelne Fragmente im Wurzelkanal haften blieben. Die Schwachstelle dieses Systems scheint demnach der Stiftbruch zu sein, bedingt durch die Sprödigkeit des Zirkondioxids (Asmussen et al. 1999). Die Sprödigkeit der Zirkondioxidkeramik erklärt sich aus der für Keramiken spezifischen Gitterstruktur. Dort existieren starke kovalente Bindungen, welche die Atomgruppen auf ihren Gitterplätzen fixieren, so dass diese chemisch abgesättigt sind.

Diese gerichteten kovalenten Bindungen lassen keine Versetzungen zu und sind somit für die Sprödigkeit verantwortlich. Im Gegensatz dazu bestehen kovalente Bindungen in einer metallischen Gitterstruktur aus ungerichteten Elektronenbindungen, die Verschiebungen und die daraus resultierende plastische Verformbarkeit zulassen (Marx et al. 2001). Wie bereits erwähnt, gestaltet sich die Entfernung der Zirkondioxid-Stifte nach Frakturen äußerst schwierig bis unmöglich und zieht meistens eine Extraktion des Zahnes nach sich. Junge weist 2002 aufgrund dieser Problematik auf eine exakte Einhaltung der Verarbeitungsanleitung und Beachtung der Indikationsbereiche dieser Wurzelstifte hin. Seiner Meinung nach sollten Zirkondioxidstifte bei ästhetisch anspruchsvollen Versorgungsmöglichkeiten im Oberkiefer-Frontzahnbereich als letzte Versorgungsmöglichkeit genutzt werden.

Gleichwohl sind in den bisher erschienenen klinischen Studien die Erfahrungen mit keramischen Wurzelstiften aus Zirkondioxid vielversprechend. In einer Untersuchung von Kern et al. 1998 wurden die konischen Zirkondioxidkeramik-Stifte Cerapost der Firma Brasseler adhäsiv mit verschiedenen Stumpfaufbauten in Front- und Seitenzähnen eingegliedert. Nach einer mittleren Beobachtungszeit von 17 Monaten kam es in keinem Fall zu Retentionsverlusten der Stifte und es traten weder Stift- noch Wurzelfrakturen auf. Ähnliche Ergebnisse konnten Kakehashi et al. 1998 vorweisen, indem sie zwischen 1995 und 1998 CosmoPost-Stifte gemäß der indirekten und direkten Methode ebenfalls im Front- und Seitenzahnbereich einsetzten. Auch hier gab es im Untersuchungszeitraum keine Misserfolge zu verzeichnen. Eine Studie mit konventionell zementierten Zirkondioxid-Stift-Stumpfaufbauten konnte eine 100%ige Erfolgsquote für einen durchschnittlichen Bemessungszeitraum von 29 Monaten nachweisen (Nothdurft und Pospiech 2006). Andere Autoren wie Edelhoff et al. (2000) und Junge (2002) belegen ebenfalls das positive klinische Ergebnis ohne Frakturen und Retentionsverluste im Beobachtungszeitraum von 15 bis 39 Monaten. Hier wurde hauptsächlich die adhäsive Befestigungsmethode gewählt. Obwohl die klinischen Ergebnisse als durchweg positiv zu beurteilen waren, sind noch Langzeitstudien erforderlich, damit die von der DGZMK geforderten Kriterien der Praxisreife erfüllt werden können (Tschernitschek und Schwarze 2005).

Eine besondere Bedeutung bezüglich der Erhöhung der Bruchfestigkeit bei der zusätzlichen Versorgung mit Kronen kommt dem Dentinsaum zu. Je größer der Dentinsaum, auch „ferrule design“ (Fassreifen-Design) genannt, umso stabiler ist das System. Libman und Nicholls stellten 1995 fest, dass sich eine Höhe zwischen Präparationsgrenze und Beginn des Stumpfaufbaus von 1,5 mm als optimal erweist. Andere Studien weisen unabhängig vom verwendeten Material für Stift-Stumpfaufbau und Krone auf einen Abstand von mindestens 2 mm hin. So erreichten bei Verwendung metallischer gegossener Stift-Stumpfaufbauten und Verblend-Keramikkronen Gegauff (2000) und Zhi-Yue und Yu-Xing (2003) mit dieser Präparationshöhe signifikante Verbesserungen der Bruchfestigkeit im Gegensatz zu niedrigeren Präparationshöhen oder fehlendem „ferrule design“. Beim Einsatz von zahnfarbenen Stiftmaterialien wie Zirkondioxid, Quarz- und Glasfaser mit direktem Kompositaufbau wurde desgleichen die 2 mm-Variante mit den höchsten Festigkeitswerten hervorgehoben (Akkayan 2004). Ferner ist ein gleichmäßig rund um den Zahn präparierter Dentinsaum vorteilhafter als ein in der Höhe abweichender (Tan et al. 2005). Ein Abstand von mindestens 2 mm wurde in der aktuellsten gemeinsamen Stellungnahme der DGZMK, DGZPW und DGZ (2005) befürwortet und kam in der vorliegenden Arbeit ebenfalls zur Anwendung.

Untersuchungen zu maximalen Kaukräften können eine grobe Orientierung über die Mindestanforderungen an überkronte Zähne geben. So werden maximale Kaukräfte von 200 N bis 300 N im Frontzahnbereich und 400 N bis 600 N im Seitenzahnbereich angegeben (Schwickerath und Coca 1987, Waltimo und Könönen 1993). Weiterhin sind Belastungen von über 300 N bei Patienten mit Bruxismus dokumentiert worden (Körber und Ludwig 1983). Killiarisis et al. (1993) berichten für den Frontzahnbereich von einer erforderlichen Bruchfestigkeit von mindestens 290 N. Dieser Wert wird um etwa 25 % überschritten, wenn die CosmoPost-Stifte mit angepresstem Aufbau zusätzlich mit adhäsiv befestigten Empress® 2-Kronen versorgt werden. Die Werte sind hier allerdings ohne Dauerbelastung dargestellt. Um dem Effekt der Materialermüdung Rechnung zu tragen, wird von Körber und Ludwig ein Sicherheitsaufschlag von 200 N empfohlen. Ferner gibt es Untersuchungen, die zeigen, dass bei mechanischer und thermischer Dauerbelastung die Festigkeit einer keramischen Restauration

auf die Hälfte absinkt, da mit einem unterkritischen Risswachstum zu rechnen ist (Tinschert et al. 1999). Geis-Gerstorfer konnte 1999 differenziert für InCeram[®] Alumina und Zirkondioxid nachweisen, dass die Dauerbiegefestigkeit auf 30 % bzw. 50 % des Ausgangswertes absinkt. Folglich ist die von uns ermittelte Bruchfestigkeit in diesem Versuchsaufbau nicht ausreichend.

Ganz wesentlich ist ein formschlüssiger Kontakt zwischen Stift und Kanalwand. Dies ist durch die genormten Vorbohrer zum CosmoPost gewährleistet, obwohl bei großlumigeren Kanälen der Durchmesser der Stifte nicht immer ausreichend ist. Eine Alternative ist der Einsatz des CosmoPost-Stiftes in umgekehrter Richtung, wofür zylinderförmige Normbohrer, z.B. des ParaPostXP[®]-Systems, verwendet werden können (Halft et al. 2002). Mit der Verwendung von Komposit als Befestigungsmaterial wird der Formkongruenz weniger Beachtung geschenkt (Krastl 2005). Hier sollen durch die adhäsive Befestigung, d.h. durch die Elastizität des Kompositmaterials, Unterschiede im Durchmesser und in abweichender Kanalform ausgeglichen werden. Dies führt zu einer gleich-bleibenden Haftfestigkeit.

Wenn es um die Befestigung von Stiften im Wurzelkanal geht, ist der Unterschied der Elastizitätsmodule zwischen endodontischem Stiftsystem und Wurzeldentin nicht unbedeutend. Bei Zirkondioxid und Dentin liegen die Elastizitätsmodule sehr weit auseinander (Isidor et al. 1996). Zwischen dem extrem steifen Zirkondioxid-Wurzelstift mit einem E-Modul von 210 GPa und dem nachgiebigeren Dentin mit einem E-Modul von 18,6 GPa entstehen unter Kaubelastung starke Spannungen, die mit Hilfe des Befestigungsmaterials ausgeglichen werden müssen. Eine solche Pufferfunktion können konventionelle Zemente aufgrund ihrer Materialeigenschaften und ihrer schlechten Anbindung an das Dentin und die Keramik nur schwer übernehmen (Hickel 1997). Bei adhäsiver Befestigung wird dem Kompositmaterial durch seine dentinähnliche Elastizität eine gute Anbindung an das Dentin und abfedernde Funktion nachgesagt. Durch das elastische Verhalten der Zementschicht entsteht unter Kaufunktion eine gleichmäßige Kräfteverteilung auf das Parodontium, was eine verbesserte Stabilität des Stift-Kronensystems zur Folge hat. Je höher indessen die Flexibilität des Stiftmaterials ist, umso weniger

relevant ist die Elastizität des Befestigungsmaterials (Lanza et al. 2005). Bezüglich des Verbundes zum Dentin ergeben sich für Zirkondioxid-Stifte aufgrund der extremen Differenz der E-Module schlechtere Verbundeigenschaften als für Titan- und Kunststoffstifte (Dietschi et al. 1997). Für das schlechtere Abschneiden wurde die hohe Steifigkeit und Rigidität des Zirkondioxids und die fehleranfällige Adhäsivtechnik verantwortlich gemacht.

Die höhere Sprödigkeit des CosmoPost-Stiftes zeigt sich auch im 3-Punkt-Biegeversuch dieser Arbeit im Vergleich zu den anderen Stiftmaterialien wie Titan, Nichtedelmetall und glasfaserverstärktem Komposit. Zirkondioxid-Stifte weisen im Spannungs-Dehnungs-Diagramm einen relativ steilen linearen Verlauf bis zum Bruch auf. Nach einer Wärmebehandlung, wie sie beim Anpressen der speziellen Glaskeramik an den CosmoPost-Stift durchgeführt wird, ist das Bruchfestigkeitsverhalten des CosmoPost nicht verändert. Mit einer um rund 5 % größeren Dehnung und somit einem etwas flacheren Kurvenverlauf im Diagramm fällt der getestete Glasfaser-Stift FRC Postec[®] auf. Dabei ist die Bruchfestigkeit des FRC Postec[®]-Stiftes nicht signifikant höher als die des CosmoPost-Stiftes, wobei die Charakterisierung des Bruches auch als Spröbruch bezeichnet werden kann. Titanstifte neigen zu einer extremen plastischen Verformbarkeit, die im Bereich der Bruchfestigkeitswerte für Zirkondioxid und glasfaserverstärktem Komposit beginnt. Wie in der Literatur bereits beschrieben, erhöht diese Eigenschaft die Gefahr einer Wurzelfraktur, so dass die hohe Frakturnrate bei Versorgungen mit Titanstiften deren Verwendung in Frage stellen sollte. Im Fall der NEM-Stifte ist eine sehr hohe Bruchfestigkeit bei einem ähnlichen Dehnungsverhalten wie die von FRC Postec[®]-Stiften nachweisbar. Es bleibt dahingestellt, ob unter klinischen Verhältnissen eine Bruchfestigkeit von über 2000 MPa, wie in dieser Arbeit für NEM-Stifte ermittelt, notwendig ist.

Laut Herstellerangaben ist eine Vorbehandlung der Zirkondioxid-Stifte vor der Weiterverarbeitung mit der Anpress-Keramik und der definitiven Eingliederung nicht notwendig, da die optimale Vorbereitung schon Bestandteil der Fabrikation sei. In einigen Untersuchungen hat sich dennoch eine Vorbehandlung der Stifte

mittels Korundstrahlen mit Aluminiumoxid (Al_2O_3) und die Anwendung eines Silikatisierungsverfahrens vor der Zementierung zur Erzielung höherer Festigkeitswerte bewährt (Edelhoff et al. 2000, Kakehashi et al. 1998, Kern et al. 1998). Die Verbesserung des Verbundes nach verschiedenen Vorbehandlungsmethoden konnte durch die Scherkraft-Versuche der vorliegenden Arbeit bestätigt werden. Die Kombination aus Korundstrahlen und Konditionierung mittels Silicoater-Verfahren (Heraeus-Kulzer) erzielte die höchsten Werte. Eine ebenso effektive Vorbehandlungsmethode war die Benetzung der Stifte mit einer dünnen Schicht $\text{ZrO}_2/\text{TiO}_2$ -Lösung (experimentelle Lösung) nach vorangegangenem Korundstrahlen.

Die rein mechanische Vorbehandlung zur Oberflächenvergrößerung durch das Korundstrahlen erfolgte durch das Aufbringen eines $100\text{ }\mu\text{m}$ gekörnten Strahlsandes bei einem Druck von 2,5 bar. Dieses Vorgehen hat sich bereits bei der Vorbereitung von Titanstiften als optimal erwiesen, wo ferner ermittelt wurde, dass mit der Verwendung eines gröberen Strahlkorns oder durch eine Steigerung des Strahldrucks keine zusätzliche Erhöhung der Verbundfestigkeit erzielt werden kann (Göbel und Welker 1996). Beim Korundstrahlen des Werkstoffs Zirkondioxid stellt sich jedoch die Frage, ob eine effektive Bearbeitung aufgrund der extremen Härte des Materials generell möglich ist (Kern und Thompson 1995). Darüber hinaus wird diskutiert, in wieweit die mechanischen Eigenschaften der Zirkondioxidkeramik durch Oberflächenbearbeitung reduziert werden. Wird in einer Studie von Luthardt et al. 2000 auf die Randzonenschädigung nach Bearbeitung durch Schleifwerkzeuge aufmerksam gemacht, beschreiben Zhang et al. 2006 eine Reduktion der Dauerbiegefestigkeit von korundgestrahltem Zirkondioxid, aufgrund von bearbeitungsbedingter Phasentransformation. Gleichermaßen wie das Korundstrahlen kann auch die Silikatisierung und Silanisierung als chemische Vorbehandlung auf den keramischen Werkstoff übertragen werden. Hierbei sind, wie auch in dieser Arbeit, das Rocatec[®]-Verfahren (3M Espe) und das Silicoater-Verfahren mittels Flammenpyrolyse häufig genutzt worden (Edelhoff und Sorensen 2002, Göbel et al. 1998, Kern und Wegner 1998). Konnte bei Titanstiften vom mechanischen Gesichtspunkt her gesehen die Einführung des chemischen Verbundes durch Silikatisierung und Silanisierung keinerlei Vorteile aufweisen (Menghini et al. 2000), ergab sich bei Zirkondioxidstiften eine

signifikante Verbesserung. Die Verwendung des Silicoater-Verfahrens hat sich in unseren Versuchen im Vergleich zum Rocatec[®]-Verfahren als das effektivere erwiesen.

Bei allen Dentalkeramiken ist unter Einfluss der Mundhöhle mit einer Abnahme der Bruchfestigkeit zu rechnen. Für die künstliche Alterung ist ein Temperaturlastwechsel zwischen 5° und 60°C mit 25.000 Zyklen eine gebräuchliche Methode. Betrachtet man die unbehandelten Wurzelstifte und die korundgestrahlten mit zusätzlicher Silicoater-Konditionierung nach thermozyklischer Belastung, konnte in unserem Versuch ein unterschiedlicher Festigkeitsverlust des Verbundes zum Aufbaumaterial nachgewiesen werden. Im Fall der unbehandelten Stifte erwies sich der Verbund mit einer signifikanten Verschlechterung der Werte (60%ig) weitaus anfälliger auf Wechsellast als die vorbehandelten Stifte. Für diese ergab sich eine geringe Scherfestigkeitsminderung von 10 %, die nicht signifikant war. In früheren Untersuchungen war der Effekt von Thermozyklisierung bei Wurzelstiften ebenfalls nicht signifikant (Fehér et al. 1999, Nergiz et al. 2001). Dies wurde mit den fehlenden Umwelteinflüssen auf das Befestigungsmaterial in der Wurzel erklärt (Schönbrodt et al. 2003), was aber in den vorliegenden Untersuchungen nicht als Begründung in Frage kommt und daher eher auf gute Materialeigenschaften schließen lässt. Im Gegensatz zu einer Verminderung des Verbundes beschreiben Friedel und Kern 2006 eine rund 10%ige Steigerung der Bruchfestigkeit nach Kausimulation im Fall von Zirkondioxid-Stiften mit Keramik-Stumpfaufbauten (hier Cerapost-Stifte, Fa. Brasseler mit adhäsiv verankerten InCeram[®]-Alumina-Aufbauten). Eine mögliche Ursache für dieses Ergebnis wird in der Studie allerdings nicht formuliert.

Für den Stumpfaufbau in Kombination mit einem Zirkondioxid-Stift gibt es laut Herstellerangaben des weiteren die Möglichkeit, ein Kompositmaterial zu verwenden, welches mit Hilfe der Adhäsiv-Technik verarbeitet wird. Obwohl Butz et al. 2001 der Ansicht sind, dass Zirkondioxid-Stifte mit Kompositaufbauten aufgrund von geringerer Bruchfestigkeit nicht für die klinische Anwendung empfohlen werden können, zeigt diese Arbeit mit der Versuchsanordnung zur Testung der Druck-Scherfestigkeit, dass durch entsprechende Vorbehandlung der

Stifte der Verbund wesentlich verbessert werden kann. Mit den Vorbehandlungskombinationen Korundstrahlen, Konditionierung mittels Benetzung von $\text{ZrO}_2/\text{TiO}_2$ -Lösung oder Silikatisierung und anschließender Opakerbeschichtung lagen die Festigkeitswerte über denen des CosmoPost mit angepresstem Aufbau. Nach thermozyklischer Belastung relativierte sich dieser Vorteil und die Werte verschoben sich knapp unter diejenigen der gleichen Vorbehandlungsmethode mit Keramikaufbau. Dennoch bleibt der Verbund im Vergleich zum unbehandelten Stift um ein Zehnfaches erhöht. In einer ähnlichen Versuchsanordnung mit zylindrischen Probekörpern an Keramikstiften von Edelhoff und Sorensen 2002 wurden unter anderem CosmoPost-Stifte mit IPS Empress® Cosmo-Aufbau und CosmoPost-Stifte mit Verwendung eines Kompositaufbaus aus Tetric® Ceram auch nach thermischer Wechsellast zwischen 5° und 55°C mit 25.000 Zyklen auf ihre Bruchfestigkeit untersucht. Es konnte nach ausgewählten Vorbehandlungen der Stifte (modifizierte Silikatisierung mittels Rocatec®-System) kein bedeutender Unterschied zwischen beiden Varianten herausgestellt und außerdem eine zuverlässige Haftfestigkeit erreicht werden. Schlussfolgernd werden die indirekte und direkte Methode zur Herstellung von Stift-Stumpfaufbauten mit dem CosmoPost-Stift unter der Bedingung einer vorherigen Konditionierung empfohlen. In einer späteren Studie interessierte zusätzlich zur Verbundfestigkeit der Einfluss der tribochemischen Behandlung des Rocatec®-Systems mit anschließender Silanisierung auf die Biegefestigkeit der Zirkondioxid-Stifte (Xible et al. 2006). Signifikante Steigerungen für die Verbundfestigkeit zwischen Zirkondioxid-Stift und Aufbaukomposit und für die Biegefestigkeit der Stifte sind auch hier dokumentiert worden.

Aufgrund von vielfachen Studien zu faserverstärkten Epoxidharzstiften mit positiven Untersuchungsergebnissen werden diese in der zahnärztlichen Praxis zunehmend verwendet (Ferrari et al. 2000a, Fredriksson et al. 1998, Scotti et al. 2002, Mannocci et al. 1999). Anfangs nutzte man hauptsächlich Stifte mit Karbonfasern in der Epoxidharzmatrix als Alternative zu metallischen Wurzelstiftsystemen wie gegossene Stift-Stumpfaufbauten oder Titanstifte mit Aufbauten aus Komposit (Fokkinga et al. 2003). Mit der Einführung von Quarz- oder Glasfasern als Verstärkungsmaterial der Kunststoffmatrix waren auch

zahnfarbene bzw. transparente Wurzelstifte mit ähnlich guten werkstoffkundlichen Eigenschaften erhältlich (Ferrari et al. 2000b). Das Indikationsspektrum reicht hierbei von endodontisch behandelten Zähnen mit geringeren Defekten in der Zahnhartsubstanz bis zur Versorgung stark zerstörter Zähne, wenn eine Vervollständigung des Zahnstumpfes durch einen Kompositaufbau durchgeführt wird. Im Vergleich von quarz- und glasfaserverstärkten Stiften zu metallischen Stiften stellte sich immer wieder heraus, dass die zahnfarbenen Stifte nicht nur hinsichtlich der Ästhetik einen Vorteil aufweisen, sondern auch bezüglich der Bruchfestigkeit. Wenn sie adhäsiv in der Wurzel verankert sind, stellen sie gleichwertige Versorgungsmöglichkeiten dar (Glazer 2002, Bolhuis et al. 2004, Goto et al. 2005). Eine Studie von Akkayan und Gülmez (2002) zeigt, dass adhäsiv befestigte Titanstifte mit Kompositaufbau signifikant geringere Bruchfestigkeiten aufweisen als mit Quarzfaser-Stiften und Kompositaufbau versorgte Zähne. In die gleiche Untersuchung wurden auch Zirkondioxid- und Glasfaser-Stifte einbezogen, die ebenfalls adhäsiv befestigt und mit Kunststoffaufbauten versehen wurden. Beide Systeme waren in Bezug auf die Bruchfestigkeit den Quarzfaser-Stiften unterlegen, im Vergleich zueinander jedoch äquivalent. Ein wichtiger Aspekt bei Belastungstests von Stift-Stumpfaufbauten ist zudem das Frakturverhalten der Wurzel-Kronen-Einheit. Die Gefahr einer Wurzelfraktur bei der Verwendung von Faserstiften ist erheblich niedriger als die bei metallischen Stiftversorgungen (Akkayan und Gülmez 2002, Salaei et al. 2002). Dies lässt sich mit der Flexibilität des Kunststoffes erklären (Rengo 1999). Das Elastizitätsverhalten des faserverstärkten Kunststoffes ist ähnlich dem des Dentins, wodurch weniger Spannungen im Grenzbereich beider Materialien auftreten und somit einer Fraktur entgegengesteuert wird. Sollte es dennoch bei Überbelastung zu Brüchen kommen, liegt die Frakturlinie im Kronenbereich oder es findet ein Stiftbruch im oberen Drittel statt. Man spricht in diesem Fall von vorteilhaften Frakturen (Martinez-Insua 1998). Bei eventuellen Frakturen des Stiftes ist die Möglichkeit der einfachen und sicheren Entfernung ohne zusätzlichen Substanzverlust von Wurzeldentin gegeben und der Zahn kann erneut versorgt werden (Cormier et al. 2001, de Rijk 2000, Sakkal 1996). Im Gegensatz dazu stehen irreparable Wurzelfrakturen bei metallischen Stift-Stumpfaufbau-Systemen und frakturierte Stifte bei Zirkondioxidversorgungen, die,

wie bereits berichtet, nicht ohne Schädigung und Schwächung des Wurzel Dentins entfernt werden können.

Als Stumpfaufbaumaterialien werden herkömmliche Hybridkomposite oder solche die speziell für Aufbauten vorgesehen sind, verwendet. Die Ausdehnung des Befestigungskomposits der Stifte auf den zu restaurierenden Stumpfanteil erscheint aufgrund von geringeren Festigkeitswerten nicht geeignet (Sadek et al. 2006).

Unsere Testung für die Druck-Scherfestigkeit von glasfaserverstärkten FRC Postec®-Stiften verbunden mit dem Komposit Tetric® Ceram zeigte, dass auch hier eine Vorbehandlung der Stifte zur Steigerung der Haftfestigkeit möglich ist. Mit der Kombination Korundstrahlen, Konditionierung mit Haftsilan und zusätzlicher Opakerbeschichtung wurden die höchsten Werte erzielt, die ohne thermozyklische Belastung unter denen des CosmoPost mit Kompositaufbau - ebenfalls ohne Thermozyklisierung - lagen. In der Literatur finden sich einige Vorbehandlungsmöglichkeiten für Faserstifte in unterschiedlichen Versuchsanordnungen. Monticelli et al. (2005a) wendeten fünf verschiedene Säurebehandlungen an, beispielsweise Wasserstoffperoxid (H_2O_2 , 10%ig) oder Salzsäure (10 Vol.% HCl), und silanisierten anschließend. Die Adhäsion des Kompositmaterials konnte somit durch die erhaltene mikromechanische und chemische Retention verbessert werden. In einer anderen Untersuchung konnte der Haftverbund durch Erhöhung der Silanisierungstemperatur auf 38 °C gesteigert werden (Monticelli et al. 2005 b). Nachweislich sind ohne Anwendung von Vorbehandlungsmethoden wie Korundstrahlen und Silanisierung signifikant niedrigere Verbundfestigkeitswerte zum Komposit zu verzeichnen (Balbosh und Kern 2006, Goracci et al. 2005). Betrachtet man den Verbund zwischen faserverstärkten Stiften zum Kompositmaterial nach Thermozyklisierung und Kausimulation, so wird von einer Minderung der Bruch- und Biegefestigkeit um 18 % berichtet (Lassila et al. 2004). Die Haltbarkeit des Verbundes muss daher noch optimiert und gerade hinsichtlich der in der Mundhöhle herrschenden Stressbedingungen über Langzeitstudien bestätigt werden.

Für den Verbund zu einem dünnfließenderen Komposit, in diesem Fall zum dualhärtenden Befestigungskomposit Variolink® II, können mit FRC Postec®-Stiften höhere Festigkeitswerte erzielt werden als mit CosmoPost-Stiften. Die Vorbehandlung mit Korundstrahlen, Silikatisierung und Opakerbeschichtung sind hier ebenfalls von großem Vorteil. Durch die Vorbereitung mittels Korundstrahlen wird die Oberfläche der Kunststoff-Stifte vergrößert und die oberflächliche Schicht der Epoxid-Harz-Matrix freigelegt (Monticelli et al. 2006). So diffundieren fließfähige Kompositmaterialien besser in die Zwischenräume als höher visköse Aufbaukomposite (Mannocci et al. 2005). Wenn vor dem Aufbringen des Komposits silanisiert wird, entsteht eine optimale Oberflächenbenetzung. Das Auftragen eines lichthärtenden Opakers nach Silanisierung hat sich in unseren Versuchen als effektive Zusatzvorbehandlung mit den höchsten Scherfestigkeitswerten erwiesen. Allerdings müsste hierbei die Formkongruenz zwischen Wurzelkanal und Stift beachtet und eine möglichst dünne Schicht des Opakers aufgetragen werden, damit die Passung nicht gefährdet und ein komplettes Auffüllen des Kanals gewährleistet ist.

Die Frage nach dem Befestigungsmaterial mit den besten Haftfestigkeitswerten an Dentin und Stiftmaterial wird unterschiedlich beantwortet. Studien mit verschiedenen Stiftsystemen, abweichenden Vorbehandlungsmethoden und einer sehr großen Anzahl verschiedener Befestigungskomposite erschweren einen effektiven Vergleich (Ernst et al. 2005, Schönbrodt et al. 2003). Es kristallisiert sich hierbei jedoch, unabhängig von der Materialauswahl und Stiftkonditionierung, heraus, dass dualhärtende Zemente die besten Ergebnisse hervorbringen (Piwowarczyk et al. 2005). Dies begründet sich nicht zuletzt durch die eingeschränkte Durchhärtung von lichthärtenden Komposits im apikalen Drittel des Stiftes (Bassi 2001), obwohl bei durchsichtigen Faserstiften eine vollständige Polymerisation gewährleistet wird (Sawada et al. 2002). Für die ausreichende Haftung am Dentin wurden zumeist Mehrflaschen-Adhäsivsysteme bevorzugt (Vichi et al. 2002), allerdings werden in neueren Untersuchungen ähnliche Haftfestigkeitswerte auch bei der einfachen Verwendung von selbstadhäsiven Kompositzementen, wie zum Beispiel RelyX™ Unicem (3M Espe), in Verbindung mit Keramikrestorationen beschrieben (Ernst et al. 2005, Piwowarczyk et al.

2005). Für den Verbund von Befestigungskompositen zu Zirkondioxidstiften gelten die gleichen Richtlinien wie in unserer Versuchsreihe der CosmoPost-Stifte mit Komposit-Probekörpern bereits beschrieben. Vorbehandlungen wie Korundstrahlen und Silanisierung sind demnach ein wichtiger Bestandteil für die Haftfestigkeitssteigerung (Lehmann et al. 2006). In einer Studie von Jahn et al. (2006) konnte dies in Verbindung mit vorbehandelten Zirkondioxidgerüsten (In-Ceram®-Zirkonia und In-Ceram® YZ, Firma Vita) ebenfalls bestätigt werden. Hier wurden Adhäsivbrücken mit Silicoater oder mit einem Metal Primer vorbehandelt, was eine erneute Steigerung des Verbundes in Verbindung mit dem dualhärtenden Variolink® II-Befestigungskomposit bewirkte. Das dort verglichene selbstadhäsive Befestigungskomposit Panavia® F 2.0 schnitt in diesem Fall signifikant schlechter ab. Immerhin kann ein effektiver Verbund zwischen Keramik und Zahnhartsubstanz mittels Befestigungskomposit erreicht werden (Kern und Ludwig 2002, Preußker et al. 2003). Eine Studie von Wrbas et al. zeigte 2006 zudem, dass der Verbund von verschiedenen Befestigungskompositen zu verschiedenen glasfaserverstärkten Stiften unterschiedlich ist. Demnach hat die Kombination von Stift und Befestigungsmaterial großen Einfluss auf die Zugfestigkeit.

In Bezug auf die koronale Dichtigkeit in Anwendung der adhäsiven Befestigung konnte in einigen Untersuchungen mit Metall-, Karbon- und Glasfaserstiften gezeigt werden, dass signifikant weniger Undichtigkeiten festzustellen waren als bei konventioneller Befestigung mit Zinkphosphat- und Glasionomermazement (Bachicha et al. 1998, Mannocci et al. 2001, Bitter und Kielbassa 2004).

Inwieweit die Materialermüdung die Randqualität zwischen Komposit und Dentin von prothetischen Restaurationen mit Zirkondioxid- und Glasfaserstiften nach adhäsiver Befestigung unter Einfluss von klinischer Belastung gefährdet, kann aufgrund von mangelnden Langzeitstudien noch nicht genau beurteilt werden (Perdigao und Lopes 1999, Rosentritt et al. 2000).

7 Schlussfolgerung

Der konfektionierte Zirkondioxidwurzelstift CosmoPost kann in Verbindung mit dem passenden Aufbau aus angepresster Glaskeramik oder aus direkt modelliertem Kompositmaterial als Stift-Stumpfaufbau genutzt werden. Besonders im oberen Frontzahnbereich wo ästhetische Aspekte eine wichtige Rolle spielen, kann so eine anspruchsvolle metallfreie Lösung angeboten werden. Voraussetzung für die Haltbarkeit dieser Versorgung ist in jedem Fall das Vorhandensein einer zirkulären Restdentinstärke („ferrule design“) von mindestens 2 mm. Die Verwendung eines Komposits als Aufbaumaterial ist bevorzugt bei geringerem Zahnhartsubstanzenverlust zu empfehlen, da hier untersichgehende Defekte ohne Schleifverlust ausgeglichen werden können. Geht es aber um größere Ausmaße des zu ersetzenden Zahnes, ist der Aufbau aus angepresster Keramik zweckmäßiger, da die Verbundfestigkeit zwischen Stift und angepresstem Aufbau signifikant höher ist. Das zeigte sich in den Versuchen dieser Arbeit besonders nach erfolgter Thermozyklisierung.

Der Verbund zwischen Zirkondioxidstift und den beiden Aufbaumaterialien kann durch sinnvolle Vorbehandlungsmaßnahmen wie Korundstrahlen, Silikatisierung und, im Falle der Kompositverwendung, durch zusätzliches Auftragen eines lichthärtenden Opakers erheblich gesteigert werden. Eine Verwendung der wie vom Hersteller angeratenen unbehandelten Form des Stiftes kann demnach optimiert werden. Wird eine solche Vorbehandlung vorgenommen, ergeben sich für beide Aufbaumaterialien nach thermischer Dauerbelastung ähnliche Druck-Scherfestigkeitswerte, so dass in diesem Falle beide Varianten für die Versorgung stärker zerstörter Zähne genutzt werden können.

Da die Gefahr einer Fraktur des CosmoPost-Stiftes nicht auszuschließen ist und dadurch häufig eine Extraktion des versorgten Zahnes notwendig wird, ist nach dem derzeitigen Kenntnisstand die Verwendung von glasfaserverstärkten Kunststoffstiften anzuraten. Die geringere Gefahr einer Wurzel- oder Stiftfraktur, die leichtere Entfernbarkeit des Stiftes bei Misserfolgen und die hervorragende Ästhetik spricht für deren Anwendung. Eine ähnliche Verbundfestigkeit zwischen Kompositmaterial und Glasfaser-Stift im Vergleich zum CosmoPost-Stift konnte in

dieser Arbeit jedoch nicht bestätigt werden. Obwohl hier ebenfalls eine Steigerung des Haftverbundes von Wurzelstift zu Kompositmaterial durch Korundstrahlen, Silanisierung und Opakerbeschichtung erzielt werden konnte, waren die Höchstwerte signifikant niedriger. Nur im Vergleich zu unbehandelten CosmoPost-Stiften ist diesbezüglich ein Vorteil für die Verwendung von Glasfaserstiften gegeben.

Wenn es um den Verbund der beiden Stiftarten zum Befestigungskomposit geht, wird deutlich, dass sich nach den schon genannten Vorbehandlungsmaßnahmen geringfügig höhere Haftwerte bei den Glasfaserstiften ergeben.

Allerdings müssen aufgrund der fehleranfälligen adhäsiven Befestigung und der Materialermüdung von Kompositen unter klinischen Bedingungen Langzeitergebnisse für beide Stiftmaterialien abgewartet werden, um ein System abschließend hervorzuheben. Gerade die Elastizität von Glasfaserstiften könnte unbemerkte Randspalten produzieren, womit die Langlebigkeit der so versorgten Kronen stark eingeschränkt würde.

8 Literaturverzeichnis

1. Akkayan B. 2004. An in vitro study evaluating the effect of ferrule length on fracture resistance of endodontically treated teeth restored with fiber-reinforced and zirconia dowel systems. J Prosthet Dent 92(2): 155-162
2. Akkayan B, Gülmez T. 2002. Resistance to fracture of endodontically treated teeth restored with different post systems. J Prosthet Dent 87(4): 431-437
3. Asmussen E, Peutzfeld A, Heitmann T. 1999. Stiffness, elastic limit and strength of newer types of endodontic posts. J Dent 27: 275-278
4. Attin T, Hellwig E, Hilgers R. 1994. Der Einfluss verstärkender Wurzelstifte auf die Frakturanfälligkeit endodontisch versorgter Zähne. Dtsch Zahnärztl Z 49: 586-589
5. Babenhauserheide K, Freesmeyer WB. 2004. Bruchlastverhalten metallfreier Stiftaufbausysteme nach künstlicher Alterung. ZWR 113(12): 553-558
6. Bachicha WS, DiFiore PM, Miller DA, Lautenschlager EP, Pashley DH. 1998. Microleakage of endodontically treated teeth restored with posts. J Endod 24: 703-708
7. Balbosh A, Kern M. 2006. Effect of surface treatment on retention of glass-fiber endodontic posts. J Prosthet Dent 95(3): 218-233
8. Bassi M. 2001. Light diffusion through double taper quartz-epoxy fiber posts. Proceedings from the 5th International Symposium 21-26
9. Bitter K, Kielbassa AM. 2004. Dentinadhäsive in der Endodontie – Ein Überblick. Endodontie 13(1): 57-74

10. Bolhuis P, de Gee A, Feilzer A. 2004. Influence of fatigue loading on four post-and-core systems in maxillary premolars. *Quintessenz Int* 35(8): 657-667
11. Butz F, Lennon AM, Heydecke G, Strub JR. 2001. Survival rate and fracture strength of endodontically treated maxillary incisors with moderate defects restored with different post-and-core systems: an in vitro study. *Int J Prosthodont* 14(1): 58-64
12. Cormier CJ, Burns DR, Moon P. 2001. In vitro comparison of the fracture resistance and failure mode fiber, ceramic and conventional post systems at various stages of restoration. *J Prosthodont* 10(1): 26-36
13. Creugers NHJ, Mentink AGB, Kayser AF. 1993. An analysis of durability data on post and core restorations. *J Dent* 21(5): 281-284
14. de Rijk WG. 2000. Removal of fiber posts from endodontically treated teeth. *Am J Dent* 13: 19B-21B
15. Dietschi D, Romelli M, Goretti A. 1997. Adaptation of adhesive posts and cores to dentin after fatigue loading. *Int J Prosthodont* 10: 498-507
16. Edelhoff D, Abuzayeda M, Yildirim M, Spiekermann H, Marx R. 2000. Adhäsion von Komposits an hochfester Strukturkeramik nach unterschiedlichen Oberflächenbehandlungen. *Dtsch Zahnärztl Z* 55(9): 617-623
17. Edelhoff D, Horstkemper T, Richter EJ, Spiekermann H, Yildirim M. 2000. Adhäsiv und konventionell befestigte Empress1-Kronen. *Dtsch Zahnärztl Z* 55: 326-330
18. Edelhoff D, Sorensen JA. 2002. Retention of selected core materials to zirconia posts. *Operative Dent* 27: 455-461

19. Edelhoff D, Spiekermann H, Yildirim M. 2000. Klinische Erfahrungen mit konfektionierten Wurzelstiften und individuellen Stumpfaufbauten aus Keramik. Dtsch. Zahnärztl. Z 55: 746-750
20. Eichner K, Kappert HF. 1996. Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Bd.1: Grundlagen und Verarbeitung. Hüthig Verlag Heidelberg
21. Ernst CP, Cohnen U, Stender E, Willershausen B. 2005. In vitro retentive strength of zirconium oxide ceramic crowns using different luting agents. J Prosthet Dent 93(6): 551-558
22. Fehér A, Egger B, Lüthy H, Schumacher M, Loeffel O, Schärer P. 1999. ISO-Zementevaluation und klinische Untersuchungen zu Zirkondioxid-stiftaufbauten. Acta Med Dent Helv 4: 201
23. Fernandes AS, Shetty S, Coutinho I. 2003. Factors determining post selection: a literature review. J Prosthet Dent 90: 556-562
24. Ferrari M, Vichi A, Garcia-Godoy F. 2000 A. Clinical evaluation of fiber-reinforced epoxy resin posts and cast post and cores. Am J Dent 13: 15B-18B
25. Ferrari M, Vichi A, Mannocci F, Mason PN. 2000 B. Retrospective study of the clinical performance of fiber posts. Am J Dent 13: 9B-13B
26. Fischer H, Edelhoff D, Marx R. 1998. Mechanische Beanspruchbarkeit von Zirkondioxid-Wurzelstiften. Dtsch Zahnärztl. Z 53: 854-858
27. Fredriksson M, Astback J, Pamenius M, Arvidson K. 1998. A retrospective study of 236 patients with teeth restored by carbon fiber-reinforced epoxy resin posts. J Prosthet Dent 80: 151-157

28. Friedel W, Kern M. 2006. Fracture strength of teeth restored with all-ceramic posts and cores. Quintessence Int 37(4): 289-295

29. Gegauß AG. 2000. Effect of crown lengthening and ferrule placement on static load failure of cemented cast post-cores and crowns. J Prosthet Dent 84(2): 169-179

30. Geis-Gerstorfer J, Fäßler P. 1999. Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten der Dentalkeramiken Zirkondioxid-TZP und In-Ceram. Dtsch Zahnärztl Z 54(11): 692-694

31. Gemeinsame Stellungnahme der DGZMK, DGZPW, DGZ. 2005. Aufbau endodontisch behandelter Zähne. Endodontie 14/2: 143-146

32. Glazer B. 2002. Endodontic post evolution: From metal to quartz. Oral Health May: 43-45

33. Göbel R, Welker D. 1996. Legierungs-Kunststoff-Verbunde in der Zahnmedizin – experimentelle Stressung und Prüfung. Swiss Dent 11-S: 22-28

34. Göbel R, Luthardt R, Welker D. 1998. Experimentelle Untersuchungen zur Befestigung von Restaurationen aus Zirkondioxid und Titan. Dtsch. Zahnärztl. Z 53: 295-298

35. Goracci C, Raffaelli O, Monticelli F, Balleri B, Bertelli E, Ferrari M. 2005. The adhesion between prefabricated FRC posts and composite resin cores: microtensile bond strength with and without post-silanization. Dent Mater 21: 437-444

36. Goto Y, Nicholls JI, Phillips KM, Junge T. 2005. Fatigue resistance of endodontically treated teeth restored with three dowel-and-core systems. J Prosthet Dent 93(1): 45-50

37. Gupta TK, Bechthold JH, Kuznickie RC, Cadorff LH, Rossing BR. 1977. Stabilisation of tetragonal phase in polycrystalline zirconia. J Mater Sci 12, 2421-2426
38. Halft M, Koeck B, Utz KH. 2002. Problematik der Restauration wurzelgefüllter Zähne. Zahnärztl. Mitt. 92: 44-50
39. Herrmann G. 1996. In-vitro-Studie zur Belastbarkeit vollkeramischer Stiftekernaufbauten aus der leuzitverstärkten Glaskeramik IPS-Empress. Zahnmed. Diss., Universität Regensburg
40. Helfer A, Melnick S, Schilder H. 1972. Determination of the moisture content of vital and pulpless teeth. Oral Surg Oral Med Oral Pathol 34: 661-670
41. Hemmings KW, King PA, Setchell DJ. 1991. Resistance to torsional forces of various post and core designs. J Prosthet Dent 66(3): 325-329
42. Heydecke G, Butz F, Hussein A, Strub JR. 2002. Fracture strength after dynamic loading of endodontically treated teeth restored with different post-and-core systems. J Prosthet Dent 87(4): 438-445
43. Heydecke G, Peters M. 2002. The restoration of endodontically treated, single-rooted teeth with cast or direct post and cores: A systematic review. J Prosthet Dent 87: 380-386
44. Hickel R. 1997. Moderne Füllungswerkstoffe. Dtsch Zahnärztl Z 52: 572-582
45. Isidor F, Brøndum K, Ravnholt G. 1999. The influence of post length and crown ferrule length on the resistance to cyclic loading of bovine teeth with prefabricated titanium posts. Int J Prosthodont 12:78-82
46. Isidor F, Oedman P, Brøndum K. 1996. Intermittent loading of teeth restored using prefabricated carbon fiber posts. Int J Prosthodont 9(2): 131-136

47. Jahn F, Bode D, Göbel R, Gnauck M, Küpper H. 2006. In-vitro-Untersuchungen zu CAD/CAM-gefertigten vollkeramischen Adhäsivbrücken. Dtsch Zahnärztl Z 61: 417-421
48. Janssen U, Hülsmann M. 2003. Das Bruchlastverhalten endodontisch verankerter Aufbauten mit den Wurzelstiftsystemen Luscent-Anchor und Perma-tex im In-vitro-Test. Dtsch Zahnärztl Z 58: 331-336
49. Jeong SM, Ludwig K, Kern M. 2002. Investigation of the fracture resistance of three types of zirconia posts in all-ceramic post-and-core restorations. Int J Prosthodont 15(2): 154-158
50. Junge LM. 2002. Klinische Erfahrungen mit zwei vollkeramischen Wurzelstiftsystemen. Zahnmed. Diss. Aachen
51. Kakehashi Y, Lüthy H, Naef R, Wohlwend A, Schärer P. 1998. A new all-ceramic post and core system: clinical, technical and in vitro results. Int J Periodont Rest Dent 18(6): 587-593
52. Kern M, Knode H. 1991. Stiftkernaufbauten aus In-Ceram – Direkte und indirekte Methode. Quintessenz Zahntech 17(8): 917-925
53. Kern M, Pleimes AW, Strub JR. 1995. Bruchfestigkeit metallischer und vollkeramischer Stiftkernaufbauten. Dtsch Zahnärztl Z 50(6): 451-453
54. Kern M, Simon MH, Strub JR. 1998. Erste klinische Erfahrungen mit Wurzelstiften aus Zirkondioxidkeramik. Dtsch Zahnärztl Z 53(4): 266-268
55. Kern M, Thompson VP. 1995. Bonding to a glass infiltrated alumina ceramic: adhesive methods and their durability. J Prosthet Dent 73(3): 240-249
56. Kern M, Wegner SM. 1998. Bonding to zirconia ceramic: Adhesion methods and their durability. Dent Mater 14(1): 64-71

57. Killiarisis S, Kjellberg H, Wenneberg B, Engström C. 1993. The relationship between maximal force, bite force endurance and facial morphology during growth. A cross-sectional study. *Acta Odont Scand* 51: 323-327
58. Körber KH, Ludwig K. 1983. Maximale Kaukraft als Berechnungsfaktor zahntechnischer Konstruktionen. *Dent Lab* 31: 55
59. Koutayas SO, Kern M. 1999. Vollkeramische Stiftkernaufbauten – Stand der Technik. *Quintessenz* 50: 701-711
60. Krastl G. 2005. Die postendodontische Restauration – Wurzelkanalstifte: wann und wie? *Endodontie* 14(2): 129-142
61. Kwiatkowski SJ, Geller W. 1989. A preliminary consideration of the Glass-Ceramic dowel post and core. *Int J Prosthodont* 2: 51-55
62. Lanza A, Aversa R, Rengo S, Apicella D, Apicella A. 2005. 3D FEA of cemented steel, glass and carbon posts in a maxillary incisor. *Dent Mater* 21: 709-715
63. Lassila LVJ, Tanner J, Le Bell AM, Narva K, Vallittu PK. 2004. Flexural properties of fiber reinforced root canal posts. *Dent Mater* 20: 29-36
64. Leibrock A, Herrmann G, Behr M, Rosentritt M, Handel G. 1996. Fracture strength of IPS Empress all-ceramic posts and cores. *J Dent Res* 75, IADR Abstract No 377
65. Libman W, Nicholls J. 1995. Load fatigue of teeth restored with cast post and cores and complete crowns. *Int J Prosthodont* 8, 155-161
66. Ludwig K, Sassenscheid S, Kern M. 2002. Untersuchungen zur Festigkeit des Klebeverbundes zu Wurzelstiften aus Zirkondioxidkeramik. Symposium Dresden 2002, Abstract #63

67. Luthardt R, Holzhüter M, Sandkuhl O, Herold V, Walter M. 2000. Festigkeit und Randzonenschädigung von Zirkonia-TZP-Keramik nach simulierter Innenbearbeitung von Kronen. Dtsch Zahnärztl Z 55;11, 785-798
68. Magura ME, Kafrawy AH, Brown CE jr, Newton CW. 1991. Human saliva coronal microleakage in obturated root canals – an in vitro study. J Endod 17(7): 324-331
69. Mannocci F, Ferrari M, Watson TF. 1999. Intermittent loading of teeth restored using quartz fiber, carbon-quarz fiber and zirconium dioxide ceramic root canal posts. J Adhes Dent 1: 153-158
70. Mannocci F, Ferrari M, Watson TF. 2001. Mikroleakage of endodontically treated teeth restored with fibre posts and composit cores after cyclic loading: a confocal microscopic study. J Prosthet Dent 85: 284-291
71. Manocci F, Sherriff M, Watson TF, Vallittu PK. 2005. Penetration of bonding resins into fibre-reinforced composite posts: a confocal microscopic study. Int Endod J 38(1): 46-51
72. Martinez-Insua A, DaSilva L, Rilo B, Santana U. 1998. Comparison of the fracture resistances of pulpless teeth restored with a cast post and core or carbon-fiber post with a composit core. J Prosthet Dent 80: 527-532
73. Marx R. 1993. Moderne keramische Werkstoffe für ästhetische Restaurationen – Verstärkung und Bruchzähigkeit. Dtsch Zahnärztl Z 48: 229-236
74. Marx R, Fischer H, Weber M, Jungwirth F. 2001. Rissparameter und Weibullmodule: unterkritisches Risswachstum und Langzeitfestigkeit vollkeramischer Materialien. Dtsch Zahnärztl Z 56(2): 90-98

75. Matinlinna JP, Heikkinen T, Özcan M, Lassila LVJ, Vallitu PK. 2006. Evaluation of resin adhesion to zirconia ceramic using some organosilanes. Dent Mat 22: 824-831
76. Mendoza DB, Eakle WS, Kahl EA, Ho R. 1997. Root reinforcement with a resin-bonded preformed post. J Prosthet Dent 72: 591-559
77. Menghini P, Merlatti G, Tentrup A. 2000. Wurzelstifte und Aufbaumaterialien – Einfluss der Silanisierung des Substrates. Quintessenz 51(1): 61-66
78. Meyenberg KH, Lüthy H, Schärer P. 1995. Zirconia posts: a new all-ceramic concept for nonvital abutment teeth. J Esthetic Dent 7: 73-80
79. Monticelli F, Toledano M, Tay FR, Cury AH, Goracci C, Ferrari M. 2005 a. Post-surface conditioning improves interfacial adhesion in post/core restorations. Dent Mater 2005 Nov 11: online [PubMed]
80. Monticelli F, Toledano M, Osorio R, Ferrari M. 2005 b. Effect of temperature on the silane coupling agents when bonding core resin to quartz fiber posts. Dent Mater 2005 Dec 16: online [PubMed]
81. Monticelli F, Toledano M, Tay FR, Sadek FT, Goracci C, Ferrari M. 2006. A simple etching technique for improving the retention of fiber posts to resin composites. J Endod 32(1): 44-47
82. Morgano SM. 1996. Restoration of pulpless teeth: application of traditional principles in present and future contexts. J Prosthet Dent 75(4): 375-380
83. Nathanson D, Dias KR, Ashayeri N. 1993. The significance of retention in post and core restorations. Pract Periodontics Aesthet Dent 5: 82-90

84. Nergiz I, Schmage P, Platzer U. 1993. Abzugskraftmessungen bei Wurzelstiften mit verschiedenen Oberflächen. Dtsch Zahnärztl Z 48(10): 661-664
85. Nergiz I, Sohn J, Schmage P, Platzer U. 2001. Retentive strengths of metal posts using chemical surface treatment. J Dent Res 80-A:690 Nr.1305
86. Nissan J, Dmitry Y, Assif D. 2001. The use of reinforced composite resin cement as compensation for reduced post length. J Prosthet Dent 86: 304-308
87. Nothdurft FP, Gernet W, Pospiech PR. 2003. In-vitro-Untersuchungen zu vollkeramischen Stiftaufbauten aus Zirkondioxid. Dtsch Zahnärztl Z 58: 451-456
88. Nothdurft FP, Pospiech PR. 2006. Clinical evaluation of pulpless teeth restored with conventionally cemented zirconia posts: a pilot study. J Prosthet Dent 95(4): 311-314
89. Rengo S. 1999. Behaviour of RTD fiber posts in Finite Element Analysis (FEM) on three-dimesional models. Proceeding from the 3rd International Symposium 20-27
90. Palacios RP, Johnson GH, Phillips KM, Riagrodski AJ. 2006. Retention of zirconium oxide ceramic with three types of cement. J Prosthet Dent 96(2): 104-114
91. Perdigao J, Lopes MJ. 1999. Dentin bonding – questions for the new millenium. Adhes Dent 1(3): 191-209
92. Pikowarczyk A, Ottl P, Lindemann K, Zipprich H, Bender R, Lauer HC. 2005. Langzeit-Haftverbund zwischen Befestigungszementen und keramischen Werkstoffen. Dtsch Zahnärztl Z 60(6): 314-320

93. Pleims AW. 1994. Bruchfestigkeit metallischer und vollkeramischer Stiftkernaufbauten. Zahnmed. Diss., Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
94. Preußker S, Helbig EB, Klimm HW, Richter G, Koch R. 2003. Verbund zweier Befestigungskomposite und ihrer Adhäsivsysteme mit Keramik und Zahnhartsubstanzen in vitro. Dtsch Zahnärztl Z 58(10): 570-578
95. Rosentritt M, Behr M, Kujat A, Sikora M, Handel G. 2004. Einfluss der Stiftversorgung auf die In-vitro-Bruchfestigkeit und Randqualität von Frontzahnkronen. Dtsch Zahnärztl Z 59(6): 311-315
96. Rosentritt M, Fürer C, Behr M, Lang R, Handel GJ. 2000. Comparison of in vitro fracture strength of metallic and tooth-coloured posts and cores. Oral Rehabil 27(7): 595-601
97. Rosentritt M, Sikora M, Behr M, Handel G. 2004. In vitro fracture resistance and marginal adaptation of metallic and tooth-coloured post systems. J Oral Rehabil 31(7): 675-681
98. Sadek FT, Monticelli F, Goracci C, Tay FR, Cardoso PE, Ferrari M. 2006. Bond strength performance of different resin composites used as core materials around fiber posts. Dent Mater 2006 Jan 21: online[PubMed]
99. Sakkal S. 1996. Carbon-fiber post removal technique. Compend Contin Educ Dent Suppl. 20: 86
100. Salae D, Sooksuntisakoonchai N, Mangkrasan V, Jindanusorn D. 2002. Bond strength between quartz fibre posts and core materials. J Dent Res 81 IADR Abstract # 1154
101. Sawada N, Hikage S, Sakaguchi K. 2002. Shape of composite resins photopolymerized by the translucent post. J Dent Res 81 IADR Abstract #2569

102. Schönbrodt M, Schmager P, Nergiz I, Platzer U. 2003. Haftfestigkeit zahnfarbener Wurzelstifte in Abhängigkeit von der Oberflächenbehandlung und dem Befestigungskomposit. Dtsch Zahnärztl Z 58(1): 55-59
103. Schwickerath H, Coca J. 1987. Einzelkronen aus Glaskeramik. Phillip J Restaur Zahnmed 4(6): 336-338
104. Scotti R, Malferrari S, Monaco C. 2002. Clinical evaluations of quartz fiber posts: 30 months results. J Dent Res 81 IADR Abstract #2657
105. Sidoli GE, King PA, Setchell DJ. 1997. An in vitro evaluation of a carbon fiber-based post and core system. J Prosthet Dent 78: 5-9
106. Sorensen JA, Engelman MJ. 1990. Ferrule design and fracture resistance of endodontically treated teeth. J Prosthet Dent 63(6): 529-536
107. Stachniss K, Stachniss V, Lotzmann U. 2006. Scherfestigkeit von Adhäsivzement an Schmelz, Dentin, Keramik und Edelmetall nach Strahlen mit Al_2O_3 . Dtsch Zahnärztl Z 61/2: 92-96
108. Strub JR, Pontius O, Koutayas S. 2001. Survival rate and fracture strength of incisors restored with different post and core systems after exposure in the artificial mouth. J Oral Rehabil 28(2): 120-124
109. Tan PLB, Aquilino SA, Gratton DG, Stanford CM, Tan SC, Johnson WT, Dawson D. 2005. In vitro fracture resistance of endodontically treated central incisors with varying ferrule heights and configurations. J Prosthet Dent 93(4): 331-336
110. Tinschert J, Natt G, Dose B, Fischer H, Marx R. 1999. Seitenzahnbrücken aus hochfester Strukturkeramik. Dtsch Zahnärztl Z 54(9): 545-550

111. Tschernitschek H, Schwarze T. 2005. Werkstoffkundliche Eigenschaften von Wurzelkanalstiften – Eine Übersicht. Endodontie 14/2:113-126
112. Usumez A, Cobankara FK, Ozturk N, Eskitascioglu G, Belli S. 2004. Microleakage of endodontically treated teeth with different dowel systems. J Prosthet Dent 92(2): 163-169
113. Vichi A, Grandini S, Davidson CL, Ferrari M. 2002. An SEM evaluation of several adhesive systems used for bonding fiber posts under clinical conditions. Dent Mater 18(7): 495-502
114. Waltimo A, Könönen M. 1993. A novel bite force recorder and maximal isometric bite force values for healthy young adults. Scand J Dent Res 101(3): 171-175
115. Weiger R. 2000. Revision der Wurzelkanalbehandlung und adhäsiver Aufbau eines stark zerstörten Zahnes – Überlegungen und praktische Umsetzung. Endodontie 9(1): 21-27
116. Weine FS, Wax AH, Wenckus CS. 1991. Retrospective study of tapered, smooth post systems in place for 10 years or more. J Endod 17: 293-297
117. Willershausen B, Briseno B, Ernst CP, Tekyatan H, Pistorius A. 2002. Restauration endodontisch behandelter Zähne. Zahnärztl Mitt 92(24): 3018-3024
118. Wolfart M, Lehmann F, Wolfart S, Kern M. 2006. Durability of the resin bond strength to zirconia ceramic after using different conditioning methods. Dent Mater 2006 Jan 19: online[PubMed]
119. Wrbas KT, Kampe MT, Schirrmeister JF, Altenburger MJ, Hellwig E. 2006. Retention glasfaserverstärkter Wurzelkanalstifte in Abhängigkeit vom Befestigungskomposit. Schweiz Monatsschr Zahnmed 116: 18-24

120. Xible AA, de Jesus Tavaréz RR, de Araujo CdosRP, Bonachela WC. 2006. Effect of silica coating and silanization on flexural and composite-resin bond strengths of zirconia posts : An in vitro study. *J Prosthet Dent* 95(3): 224-229
121. Zalkind M, Hochmann N. 1998. Esthetic considerations in restoring endodontically treated teeth with posts and cores. *J Prosthet Dent* 79: 702-705
122. Zhang Y, Lawn BR, Malament KA, Van Thompson P, Rekow ED. 2006. Damage accumulation and fatigue life of particle-abraded ceramics. *Int J Prosthodont* 19(5): 442-448
123. Zhi-Yue L, Yu-Xing Z. 2003. Effects of post-core design and ferrule on fracture resistance of endodontically treated maxillary central incisors. *J Prosthet Dent* 89(4): 368-373

Anhang –

Statistische Auswertung (Ergebnis- und Statistiktabellen)

1. Bruchfestigkeit von CosmoPost/IPS Empress® Cosmo Stift-Stumpfaufbauten

Tabelle 1: Mittelwerte und Standardabweichung in MPa

Befestigung	Mittelwert	Standardabweichung
konventionell	302	46
adhäsiv	321	42

Statistischer Test: Mann-Whitney-U-Test → kein signifikanter Unterschied

2. Bruchfestigkeit von CosmoPost/IPS Empress® Cosmo Stift-Stumpfaufbauten mit IPS Empress® 2-Kronen

Tabelle 2: Mittelwerte und Standardabweichung in MPa

Befestigung	Mittelwert	Standardabweichung
konventionell	291	52
adhäsiv	397	103

Statistischer Test: Mann-Whitney-U-Test →

Tabelle 3: statistisch signifikante Unterschiede = ▲

	konventionell
adhäsiv	▲

3. 3-Punkt-Biegeversuch (Bruchfestigkeit verschiedener Wurzelstifte)

Tabelle 4: Mittelwerte und Standardabweichung in MPa

Stiftsorte	Mittelwert	Standardabweichung
CosmoPost	1168	76
CosmoPost vorgewärmt	1092	158
Postec	1145	14
Titan	1882	30
Remanium	2333	114

Statistischer Test: Mann-Whitney-U-Test und α -Adjustierung nach Holm →

Tabelle 5: statistisch signifikante Unterschiede = ▲

	Titan	Remanium
CosmoPost	▲	▲

4. Verbunduntersuchungen von CosmoPost-Stiften zum Aufbaumaterial

4.1. Druck-Scherfestigkeit von IPS Empress® Cosmo-Keramik-Probekörpern an CosmoPost-Stiften

Tabelle 6: Mittelwerte und Standardabweichung in MPa

Vorbehandlung	Mittelwert	Standardabweichung
unbehandelt	21,6	3,3
Zr-Ti-Lsg.	19,8	1,4
Silicoater	21	2
gestrahlt	21,9	1,9
Rocatec	18,7	1,6
gestrahlt + Silicoater	29	2,1
gestrahlt + Zr-Ti-Lsg.	27,6	2,5

Statistische Tests: Kruskal-Wallis-H-Test, Mann-Whitney-U-Test und α -Adjustierung nach Holm →

Tabelle 7: statistisch signifikante Unterschiede = ▲

	gestrahlt + Silicoater	gestrahlt + Zr-Ti-Lösung
unbehandelt	▲	▲

4.2. Druck-Scherfestigkeit von Tetric® Ceram-Probekörpern an CosmoPost-Stiften

Tabelle 8: Mittelwerte und Standardabweichung in MPa

Vorbehandlung	Mittelwert	Standardabweichung
unbehandelt	6	0,6
Silicoater	14	1,9
gestrahlt	11,6	1,5
gestrahlt + Opaker	13,4	4,8
gestrahlt + Silicoater	25,5	1,9
gestrahlt + Silicoater + Opaker	36,4	6,3
Rocatec	14,1	2
Rocatec + Opaker	31,1	12,8
Zr-Ti-Lsg.	10,8	3,4
gestrahlt + Zr-Ti-Lsg.	20,8	6,0
gestrahlt + Zr-Ti-Lsg. + Opaker	37,8	9,5

Statistische Tests: Kruskal-Wallis-H-Test, Mann-Whitney-U-Test, α -Adjustierung nach Shaffer und Holm →

Tabelle 9: ▲ = statistisch signifikante Unterschiede, ▲* = kein signifikanter Unterschied nachweisbar, vermutlich aufgrund von geringer Probenanzahl! wird als signifikant gewertet

	unbehandelt	Silicoater	gestrahlt	gestrahlt + Opaker	gestrahlt + Silicoater	gestrahlt + Silicoater + Opaker	Rocatec	Rocatec + Opaker	Zr-Ti-Lsg.	gestrahlt + Zr-Ti-Lsg.	gestrahlt + Zr-Ti-Lsg. + Opaker
unbehandelt	-										
Silicoater	▲	-									
gestrahlt			-								
gestrahlt + Opaker				-							
gestrahlt + Silicoater			▲		-						
gestrahlt + Silicoater + Opaker	▲		▲			-					
Rocatec							-				
Rocatec + Opaker	▲*						▲	-			
Zr-Ti-Lsg.									-		
gestrahlt + Zr-Ti-Lsg.									▲	-	
gestrahlt + Zr-Ti-Lsg. + Opaker	▲*								▲	▲	-

4.3. Druck-Scherfestigkeit von IPS Empress® Cosmo-Keramik-Probekörpern an CosmoPost-Stiften nach Wechsellast

Tabelle 10: Mittelwerte und Standardabweichung in MPa

Vorbehandlung	Mittelwert	Standardabw	Mittelwert vorher	% -Verlust
unbehandelt	8,8	1,2	21,6	59,3
gestrahlt + Silicoater	26,4	10,5	29,2	9,6

Statistische Tests: Mann-Whitney-U-Test →

Tabelle 11: ▲ = statistisch signifikante Unterschiede vor und nach Wechsellast

Vorbehandlung	Signifikanz nach Thermozyklierung
unbehandelt	▲
gestrahlt + Silicoater	

4.4. Druck-Scherfestigkeit von Tetric®Ceram-Probekörpern an CosmoPost-Stiften nach Wechsellast

Tabelle 12: Mittelwerte und Standardabweichung in MPa

Vorbehandlung	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert vorher	% - Verlust
unbehandelt	3,1	0,8	6	48
gestrahlt + Silicoater	18,7	4,8	25,5	27
gestr. + Silicoater + Opaker	25,4	4,5	36,4	30
Zr-Ti-Lsg.	5,8	0,8	10,8	46
gestrahlt + Zr-Ti-Lsg.	6,6	1,6	20,8	68
gestr. + Zr-Ti-Lsg. + Opaker	12,9	2,8	37,8	66

Statistische Tests: Mann-Whitney-U-Test ➔

Tabelle 13: ▲ = statistisch signifikante Unterschiede vor und nach Wechsellast

Vorbehandlung	Signifikanz nach Thermozyklierung
unbehandelt	▲
gestrahlt + Silicoater	▲
gestrahlt + Silicoater + Opaker	▲
Zr-Ti.Lsg.	▲
gestrahlt + Zr-Ti-Lsg.	▲
gestrahlt + Zr-Ti-Lsg. + Opaker	▲

5. Druck-Scherfestigkeit von Tetric® Ceram-Probekörpern an Postec-Stiften

Tabelle 14: Mittelwerte und Standardabweichung in MPa

Vorbehandlung	Mittelwert	Standardabweichung
unbehandelt	12,3	1,7
gestrahlt + Silicoater	22,2	2,5
gestrahlt + Silicoater + Opaker	29,4	2,9

Statistische Tests: Kruskal-Wallis-H-Test, Mann-Whitney-U-Test, α -Adjustierung nach Shaffer ➔

Tabelle 15: ▲ = statistisch signifikante Unterschiede

	unbehandelt	gestrahlt + Silicoater	gestr. + Silicoater + Opaker
unbehandelt	-		
gestrahlt + Silicoater	▲	-	
gestr. + Silicoater + Opaker	▲	▲	-

6. Druck-Scherfestigkeit von Variolink®II-Probekörpern an CosmoPost- und FRC Postec®-Stiften

6.1. Variolink® II / CosmoPost

Tabelle 16: Mittelwerte und Standardabweichung in MPa

Vorbehandlung	Mittelwert	Standardabweichung
gestrahlt + Silicoater + Opaker	33,5	4,6
Rocatec + Opaker	17,4	6,9
gestrahlt + Zr-Ti-Lsg. + Opaker	29,4	5,9

Statistische Tests: Kruskal-Wallis-H-Test, Mann-Whitney-U-Test, α -Adjustierung nach Shaffer ➔

Tabelle 17: ▲ = statistisch signifikante Unterschiede

	gestrahlt + Silicoater + Opaker	Rocatec + Opaker	gestrahlt + Zr-Ti-Lsg. + Opaker
gestrahlt + Silicoater + Opaker	-		
Rocatec + Opaker	▲	-	
gestrahlt + Zr-Ti-Lsg. + Opaker		▲	-

6.2 Variolink® II / FRC Postec®

Tabelle 18: Mittelwerte und Standardabweichung in MPa

Vorbehandlung	Mittelwert	Standardabweichung
unbehandelt	24,3	1,6
Monobond S	25,8	5,6
Monobond S+Opaker	40,5	6,5

Statistische Tests: Kruskal-Wallis-H-Test, Mann-Whitney-U-Test, α -Adjustierung nach Shaffer →

Tabelle 19: ▲ = statistisch signifikante Unterschiede

	unbehandelt	Monobond S	Monobond S + Opaker
unbehandelt	-		
Monobond S		-	
Monobond S + Opaker	▲	▲	-

Lebenslauf

Name, Vorname:	Oehlkers, Katja
Geburtsdatum:	19.04.1970
Geburtsort:	Hannover
1976 – 1980	Grundschule Rosenthal-Schwicheldt
1980 – 1982	Orientierungsstufe Hohenhameln
1982 – 1989	Gymnasium Groß Ilsede
1989	Abitur, Gymnasium Groß Ilsede
1989 – 1992	Ausbildung zur Zahntechnikerin mit Gesellenprüfung
1992 – 1997	Tätigkeit als Zahntechnikerin in Hannover
1997 – 2003	Studium der Zahnmedizin an der Friedrich-Schiller-Universität Jena und Abschluss mit Staatsexamen
14. Januar 2003	Approbation als Zahnärztin
2003 – 2005	Vorbereitungsassistentin in der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik und Werkstoffkunde des Zentrums für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der FSU Jena
2005 – 2007	Vorbereitungsassistentin in der Zahnarztpraxis Dr. Uwe Blunck in Hannover
seit April 2007	Niederlassung in der Gemeinschaftspraxis Fischer, Kuntze, Günay, Oehlkers in Hannover
Jena, 14.12.2007	

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass mir die Promotionsordnung der Medizinischen Fakultät der Friedrich-Schiller-Universität bekannt ist,

ich die Dissertation selbst angefertigt habe und alle von mir benutzten Hilfsmittel, persönlichen Mitteilungen und Quellen in meiner Arbeit angegeben sind,

mich folgende Personen bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts unterstützt haben: PD Dr. F. Jahn und Dr. R. Göbel,

die Hilfe eines Promotionsberaters nicht in Anspruch genommen wurde und dass Dritte weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen von mir für Arbeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen,

dass ich die Dissertation noch nicht als Prüfungsarbeit für eine staatliche oder andere wissenschaftliche Prüfung eingereicht habe und

dass ich die gleiche, eine in wesentlichen Teilen ähnliche oder eine andere Abhandlung nicht bei einer anderen Hochschule als Dissertation eingereicht habe.

Jena, 14.12.2007

Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei allen bedanken, die mich bei der Durchführung meiner Doktorarbeit unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Frau Priv.-Doz. Dr. Florentine Jahn, Poliklinik für zahnärztliche Prothetik und Werkstoffkunde der FSU Jena, für die Überlassung des Themas und alle gewährte freundliche, kompetente Unterstützung. Ihre herzliche Anteilnahme und das stete Interesse am Fortgang meiner Arbeit waren mir eine hilfreiche Motivation.

Ich danke ebenfalls Herrn Dr. Roland Göbel, wissenschaftlicher Mitarbeiter der Poliklinik für zahnärztliche Prothetik und Werkstoffkunde der FSU Jena, für Anleitung, freundliche Beratung und Hilfe in allen methodischen und werkstoffkundlichen Fragen.

Bei den Zahntechnikerinnen des Labors der FSU Jena möchte ich mich für die stete Hilfsbereitschaft, Unterstützung und Bereitstellung der Materialien herzlich bedanken.

Auch Herrn Dr. R. Vollandt, Mitarbeiter des Instituts für medizinische Statistik, Informatik und Dokumentation der FSU Jena, möchte ich meinen Dank für Anleitung und Hilfe aussprechen.

Meinen lieben Eltern, Heidi und Ernst Oehlkers, widme ich als herzliches Dankeschön diese Arbeit. Nicht nur ihr steter Glaube an mich und meine Fähigkeiten, sondern auch die moralische und finanzielle Unterstützung während meiner akademischen Ausbildung waren mir immer eine große Hilfe.